



TESIS (TM 142501)

**OPTIMASI TEBAL LAPISAN *RECAST*, KEKASARAN PERMUKAAN
DAN *MICROCRACK* PADA PROSES PEMESINAN *WIRE ELECTRICAL
DISCHARGE MACHINING* (WEDM) BAJA PERKAKAS SKD61 DENGAN
MENGUNAKAN METODE OPTIMASI *BACK-PROPAGATION NEURAL
NETWORK* (BPNN) DAN *GENETIC ALGORITHM* (GA)**

PRIMA AHMAD WIHARDI
NRP 2111201007

Dosen Pembimbing
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D
Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



THESIS (TM 142501)

**OPTIMIZATION OF RECAST LAYER THICKNESS, SURFACE
ROUGHNESS AND MICROCRACK IN THE WIRE ELECTRICAL
DISCHARGE MACHINING (WEDM) PROCESS OF SKD61 TOOL
STEEL USING *BACK-PROPAGATION NEURAL NETWORK (BPNN)*
AND *GENETIC ALGORITHM (GA)***

PRIMA AHMAD WIHARDI
NRP 2111201007

Advisor

Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D
Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.

MASTER PROGRAMME
FIELD STUDY OF ENGINEERING AND MANUFACTURING SYSTEM
DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

PRIMA AHMAD WIHARDI
NRP. 2111201007

Tanggal Ujian : 22 Januari 2016
Periode Wisuda : Maret 2016

Disetujui oleh:

1. **Ir. Bobby Gedy P. Soepangkat M.Sc., Ph.D**
NIP. 1953 05 16 197803 1 001

(Pembimbing 1)

2. **Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.**
NIP. 1973 03 22 200112 1 001

(Pembimbing 2)

3. **Prof. Dr. Ir. Suharjono, M.Sc.**
NIP. 19620604 198701 1 002

(Penguji)

4. **Bambang Pramujati, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.**
NIP. 1969 12 03 199403 1 001

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,



Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D
NIP. 1960 12 02 198701 1 001

**OPTIMASI TEBAL LAPISAN RECAST, KEKASARAN PERMUKAAN
DAN MICROCRACK PADA PROSES PEMESINAN WIRE ELECTRICAL
DISCHARGE MACHINING (WEDM) BAJA PERKAKAS SKD61 DENGAN
MENGUNAKAN METODE OPTIMASI
BACK-PROPAGATION NEURAL NETWORK DAN GENETIC ALGORITHM**

Nama Mahasiswa :Prima Ahmad Wihardi
NRP :2111201007
Pembimbing I :Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D
Pembimbing II :Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Proses pemesinan *wire electrical discharge machining* (WEDM) adalah suatu proses pemotongan yang didasarkan pada erosi karena bunga api listrik untuk menghasilkan bentuk-bentuk yang kompleks dan presisi dengan menggunakan elektroda kawat. Material benda kerja yang dipotong biasanya bersifat konduktif. Pengaturan parameter-parameter proses pemesinan WEDM yang tidak tepat akan menghasilkan lapisan *recast* yang tebal, permukaan benda kerja yang kasar, dan *microcrack* yang berjumlah banyak. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan pengaturan level-level dari parameter-parameter proses WEDM yang tepat agar dapat meminimalkan kekasaran permukaan benda kerja, tebal lapisan *recast* dan *microcrack* secara serentak.

Penelitian tentang optimasi proses WEDM dilakukan pada baja perkakas SKD61 dengan menggunakan elektroda kawat *zinc coating brass*. Percobaan dilakukan dengan memvariasikan lima parameter proses WEDM, yaitu *arc on time*, *on time*, *open voltage*, *off time*, dan *servo voltage*. Rancangan percobaan ditetapkan dengan menggunakan metode Taguchi dan berupa matriks ortogonal L_{18} , karena parameter *arcon time* memiliki dua level, dan parameter-parameter lainnya masing-masing memiliki tiga level. Replikasi dilakukan sebanyak dua kali. Hal ini disebabkan karena adanya faktor *noise* yang tidak dimasukkan ke dalam rancangan percobaan. Metode peramalan *back-propagation neural network* (BPNN) digunakan untuk pemodelan hubungan antara parameter-parameter proses dengan parameter-parameter respon. Metode optimasi *genetic algorithm* (GA) digunakan untuk menentukan seting kombinasi parameter yang dapat meminimalkan tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* secara serentak.

Model peramalan dengan BPNN yang dikembangkan memiliki arsitektur jaringan 5-8-8-3, yang terdiri dari 5 *input layer*, 2 *hidden layer* dengan 8 *neuron* pada masing-masing *hidden layer*, dan 3 *output layer*. Fungsi aktivasinya adalah *tansig* dan fungsi pelatihan adalah *trainrp*. Optimasi GA menghasilkan kombinasi parameter-parameter yang dapat meminimalkan tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* secara serentak pada seting parameter-parameter proses *arc on time* sebesar 2 μ s, *on time* sebesar 0,3 μ s, *open voltage* sebesar 90 volt, *off time* sebesar 10 μ s, dan *servo voltage* sebesar 40 volt.

Kata kunci:kekasaran permukaan,lapisan *recast*,*microcrack*, BPNN, GA.

**OPTIMIZATION OF RECAST LAYER THICKNESS, SURFACE
ROUGHNESS AND MICROCRACK IN THE WIRE ELECTRICAL
DISCHARGE MACHINING (WEDM) PROCESS OF SKD61 TOOL
STEEL USING BACK-PROPAGATION NEURAL NETWORK
(BPNN) DAN GENETIC ALGORITRM (GA)**

Student Name :Prima Ahmad Wihardi
NRP :2111201007
Advisor I :Ir. Bobby Oedy P. SoepangkatM.Sc., Ph.D
Advisor II : Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Wire electrical discharge machining process machining (WEDM) is a cutting process based on the erosion due to electric sparks to produce a complex shapes and precision by using a wire electrode. Workpiece material being cut usually is conductive. Setting the parameters of EDM machining processes that are not appropriate will produce a recast layers is thick, the workpiece surface is rough, and microcracks are amounted to much.

This research is conducted to determine levels of regulation parameters appropriate WEDM process in order to minimize the surface roughness of the workpiece, thickness layer of recast and microcracks simultaneously. Research on the EDM process optimization performed on SKD 61 tool steel with a zinc coating using a brass wire electrode. Five Experiments are performed by varying the parameters of the EDM process. Consists of the arc on time, on time, open voltage, off-time, and servo voltage. The case of parameters of the arc on time has two levels and other has three levels of each. The Trial design is set by using the Taguchi method and form of orthogonal array L18. Replication is performed twicedue to of noise factor which is not incorporated into the experimental design.

Method of forecasting backpropagation neural network (BPNN) is used for modeling the relationship between process parameters with the parameters of the respond. Methods of genetic optimization algorithm (GA) is used to determine the setting combinations of parameters that can minimize the recast layer thickness, surface roughness and microcracks simultaneously. Forecasting models developed by BPNN has a 5-8-8-3 network architecture which are consist of 5 input layer, two hidden layer with 8 neurons in each hidden layer and output layer 3. Activation function is tansig and training functions are trainrp. GA optimization produces the combination of parameters that can minimize the recast layer thickness, surface roughness and microcracks simultaneously on setting process parameters arc on time of 2 μ s, on time of 0.3 μ s, the open voltage of 90 volts, time off for 10 μ s, and the servo voltage of 40 volts.

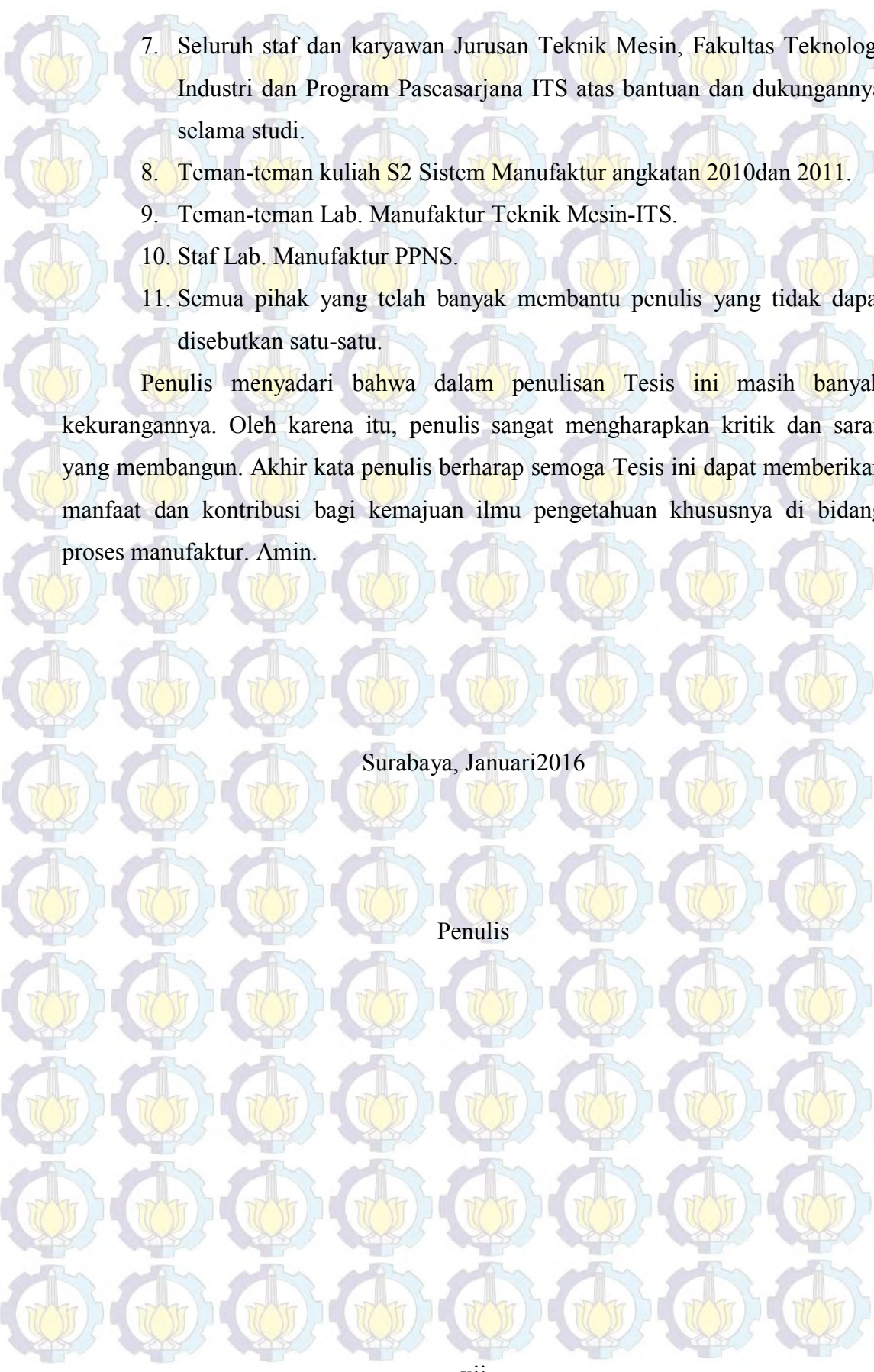
Keywords: surface roughness, recast layer, microcracks, BPNN, GA.

KATA PENGANTAR

Puji syukur AlhamdulillahRobbil'alamiin atas kehadiran ALLAH SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini. Tesis dengan judul **“OPTIMASI TEBAL LAPISAN *RECAST*, KEKASARAN PERMUKAAN DAN *MICROCRACK* PADA PROSES PEMESINAN *WIREELECTRICAL DISCHARGEMACHINING* (WEDM) BAJA PERKAKAS SKD61 DENGAN MENGGUNAKAN METODE OPTIMASI *BACK-PROPAGATION NEURAL NETWORK* (BPNN) DAN *GENETIC ALGORITHM* (GA)”** disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Rekayasa dan Sistem Manufaktur, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak atas segala bantuan dan dukunganserta dedikasinya yang telah membantu penyusunan tesis ini hingga selesai. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. selaku Kepala Program Studi Teknik Mesin Program Pascasarjana FTI - ITS.
2. Bapak Ir. Bobby O.P. Soepangkat, M.Sc, Ph.D. sebagai dosen pembimbing 1 dengan kedisiplinan dan kesabarannya menuntun penyusunan tesis ini.
3. Bapak Arif Wahyudi, S.T., M.T., Ph.D. sebagai dosen pembimbing 2 yang selalu memberikan arahan dan dukungan.
4. Bapak Bambang Pramujati, S.T., M.Sc.Eng, Ph.D. dan Bapak Prof. Dr. Ir. Suhardjono, M.Sc. sebagai dosen penguji tesis.
5. Ibu dan ayahku tersayang, Samsuhadi, S.Pd. dan Sutiwi, S.Pd., yang telah banyak memberikan dukungan dan semangat,serta doa restunya kepada penulis.
6. Seluruh staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin yang selalu memberi atmosfer kampus yang menyenangkan.

- 
7. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Program Pascasarjana ITS atas bantuan dan dukungannya selama studi.
 8. Teman-teman kuliah S2 Sistem Manufaktur angkatan 2010 dan 2011.
 9. Teman-teman Lab. Manufaktur Teknik Mesin-ITS.
 10. Staf Lab. Manufaktur PPNS.
 11. Semua pihak yang telah banyak membantu penulis yang tidak dapat disebutkan satu-satu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tesis ini masih banyak kekurangannya. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata penulis berharap semoga Tesis ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan khususnya di bidang proses manufaktur. Amin.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|---------------|
| HALAMAN JUDUL INDONESIA..... | i |
| HALAMAN JUDUL INGGRIS..... | iii |
| LEMBAR PENGESAHAN..... | v |
| ABSTRAK..... | vii |
| ABSTRACT..... | ix |
| KATA PENGANTAR..... | xi |
| DAFTAR ISI..... | xiii |
| DAFTAR GAMBAR..... | xv |
| DAFTAR TABEL..... | xvii |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 5 |
| 1.2.2. Batasan Masalah..... | 5 |
| 1.2.3. Asumsi Penelitian..... | 6 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 6 |
| 1.4 Manfaat Penelitian..... | 6 |
| BAB II DASAR TEORI..... | 7 |
| 2.1 Proses Pemesinan EDM..... | 7 |
| 2.2 Proses WEDM..... | 8 |
| 2.2.1 Mekanisme Proses WEDM..... | 9 |
| 2.2.2 Parameter Proses WEDM..... | 15 |
| 2.2.3 Jenis-Jenis Elektroda Kawat..... | 16 |
| 2.2.4 Pembilasan Geram (<i>Flushing</i>)..... | 17 |
| 2.3 Parameter-parameter Respon Eksperimen..... | 18 |
| 2.3.1 Lapisan <i>Recast</i> | 18 |
| 2.3.2 Kekasaran Permukaan..... | 20 |
| 2.3.3 <i>Microcrack</i> | 24 |
| 2.4 Metode Taguchi..... | 25 |
| 2.4.1 Desain Eksperimen Taguchi..... | 26 |
| 2.4.2 Tahap Perencanaan..... | 26 |
| 2.4.3 Tahap Pelaksanaan..... | 29 |
| 2.4.4 Tahap Analisis..... | 30 |
| 2.5 Metode Peramalan BPNN..... | 31 |
| 2.6 Metode Optimasi GA..... | 38 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... | 47 |
| 3.1 Tahapan penelitian..... | 47 |
| 3.2 Parameter-parameter dalam penelitian..... | 48 |
| 3.3 Bahan dan Peralatan Penelitian..... | 49 |

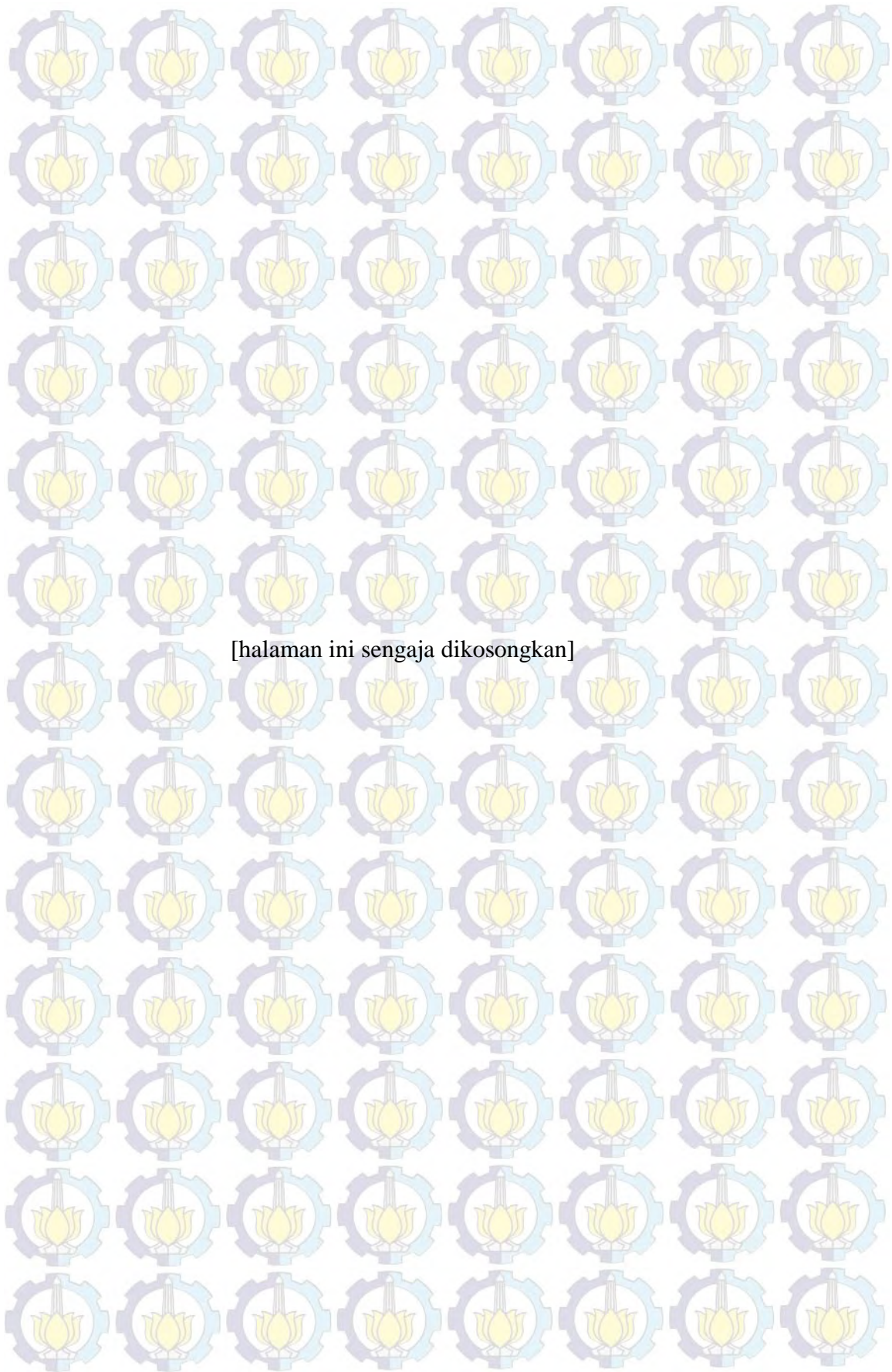
| | |
|--|-----------|
| 3.3.1 Bahan Penelitian..... | 49 |
| 3.3.2 Peralatan Penelitian..... | 50 |
| 3.4 Rancangan Percobaan..... | 52 |
| 3.4.1 Seting Parameter pada Mesin WEDM..... | 52 |
| 3.4.2 Pemilihan Matriks Ortogonal..... | 52 |
| 3.5 Prosedur Penelitian..... | 55 |
| 3.6 Pengukuran dan Pengambilan Data..... | 55 |
| 3.6.1 Pengambilan Data Tebal Lapisan <i>Recast</i> dan <i>Microcracks</i> | 55 |
| 3.6.2 Pengambilan Data Kekasaran Permukaan..... | 57 |
| 3.7 Pengolahan Data..... | 58 |
| 3.7.1 Metode Peramalan Back-propagation Neural Network..... | 58 |
| 3.7.2 Metode Optimasi Genetic Algorithm..... | 60 |
| BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN..... | 63 |
| 4.1 Data Hasil Eksperimen..... | 63 |
| 4.2 Metode Peramalan BPNN..... | 64 |
| 4.2.1 Data Input BPNN..... | 64 |
| 4.2.2 <i>Preprocessing</i> Data BPNN..... | 64 |
| 4.2.3 Arsitektur Jaringan BPNN..... | 66 |
| 4.2.4 Kriteria Pemberhentian Peramalan BPNN..... | 68 |
| 4.2.5 Inisiasi Nilai Bobot dan Bias..... | 68 |
| 4.2.6 Data Peramalan BPNN..... | 69 |
| 4.2.7 Pelatihan Jaringan BPNN..... | 69 |
| 4.2.8 Hasil Peramalan BPNN..... | 70 |
| 4.3 Metode Optimasi GA..... | 74 |
| 4.3.1 Penentuan Nilai Batas Atas dan Batas Bawah..... | 74 |
| 4.3.2 Penyetingan Nilai Diskrit ke Nilai Interger..... | 74 |
| 4.3.3 Penentuan Fungsi <i>Fitness</i> | 75 |
| 4.3.4 Penentuan Jumlah Generasi Maksimum..... | 75 |
| 4.3.5 Hasil Optimasi GA..... | 76 |
| 4.4 Perbandingan antara respon hasil kombinasi awal dan kombinasioptimal..... | 78 |
| 4.5 Pengaruh parameter proses terhadap parameter respon | 83 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... | 87 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 87 |
| 5.2 Saran..... | 87 |
| DAFTAR PUSTAKA | |
| LAMPIRAN | |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Klasifikasi Proses Pemesinan WEDM..... | 8 |
| Gambar 2.2 | Prinsip Dasar WEDM..... | 8 |
| Gambar 2.3 | Pembangkitan Tegangan dan Arus Listrik oleh Catu Daya..... | 9 |
| Gambar 2.4 | Pengikisan Material oleh Bunga Api Listrik saat <i>on time</i> | 10 |
| Gambar2.5 | Proses Pengikisan Material yang Berhenti Saat <i>off time</i> | 10 |
| Gambar2.6 | Pembilasan Geram oleh Cairan Dielektrik..... | 10 |
| Gambar 2.7 | Proses erosi asimetris..... | 12 |
| Gambar 2.8 | Laju erosi anoda dan katoda terhadap <i>on time</i> | 13 |
| Gambar 2.9 | Diagram pengisian (<i>charging</i>) dan pelepasan (<i>discharging</i>)..... | 14 |
| Gambar2.10 | Metode Flushing pada WEDM..... | 18 |
| Gambar 2.11 | Distribusi Kekerasan Masing-Masing Lapisan pada Benda Kerja Hasil WEDM..... | 19 |
| Gambar 2.12 | Parameter Kekerasan Permukaan..... | 20 |
| Gambar 2.13 | Parameter dalam Profil Permukaan..... | 21 |
| Gambar 2.14 | Foto SEM dari Baja AISI D2 Hasil Proses EDM..... | 24 |
| Gambar 2.15 | Foto SEM pada Baja AISI 4140 Hasil Proses WEDM..... | 25 |
| Gambar2.16 | Proses Crossover Satu Titik..... | 41 |
| Gambar2.17 | Proses Crossover Dua Titik..... | 41 |
| Gambar 2.18 | Proses Crossover Banyak Titik..... | 41 |
| Gambar 2.19 | Proses dan Hasil Mutasi..... | 42 |
| Gambar3.1 | Diagram Alir Metodologi Penelitian..... | 47 |
| Gambar3.2 | Mesin WEDM CHMER 32GF..... | 50 |
| Gambar 3.4 | Mitutoyo Surf test 301..... | 50 |
| Gambar3.3 | SEM EVO MA10..... | 51 |
| Gambar3.5 | Skema Proses Pemotongan..... | 54 |
| Gambar3.6 | Skema Pengukuran Tebal Lapisan Recast..... | 56 |
| Gambar 3.7 | Skema Pengukuran <i>Microcrack</i> | 56 |
| Gambar 3.8 | Skema Arah Proses Pemotongan dan Pengukuran Kekerasan Permukaan Benda Kerja..... | 57 |
| Gambar 3.9 | Diagram Alir Metode Peramalan BPNN..... | 59 |
| Gambar 3.10 | Diagram Alir Metode Optimasi GA..... | 61 |
| Gambar 4.1 | Arsitektur Jaringan BPNN..... | 67 |
| Gambar 4.2 | Model BPNN..... | 70 |
| Gambar 4.3 | Grafik nilai <i>epoch</i> untuk MSE <i>training</i> dan <i>testing</i> dari peramalan dengan BPNN..... | 71 |
| Gambar 4.4 | Grafik Data Eksperimen dan Data Output Pelatihan BPNN..... | 72 |
| Gambar 4.5 | Grafik generasi terhadap nilai <i>fitness</i> pada optimasi GA..... | 74 |
| Gambar 4.6 | Hasil pengukuran tebal lapisan <i>recast</i> | 79 |
| Gambar 4.7 | <i>Mickrocracks</i> yang terjadi pada lapisan <i>recast</i> | 80 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabel 2.1 | Nilai Kekasaran dan Tingkat Kekasaran..... | 22 |
| Tabel 2.2 | Nilai Kekasaran yang Dicapai oleh Beberapa Pengerjaan..... | 23 |
| Tabel 2.3 | Matriks Ortogonal | 29 |
| Tabel 3.1 | Seting Mesin untuk Parameter konstan..... | 52 |
| Tabel 3.2 | Seting Faktordan Level yang digunakan dalam Percobaan..... | 52 |
| Tabel 3.3 | Total Derajat Kebebasan Parameter dan Level..... | 53 |
| Tabel 3.4 | Rancangan Percobaan Taguchi..... | 53 |
| Tabel 3.5 | Tampilan Data Hasil Eksperimen..... | 54 |
| Tabel 4.1 | Data Hasil Eksperimen..... | 63 |
| Tabel 4.2 | Data Hasil Preprocessing pada Peramalan BPNN..... | 65 |
| Tabel 4.3 | Level Parameter BPNN yang Divariasikan..... | 67 |
| Tabel 4.4 | Rincian model BPNN..... | 67 |
| Tabel 4.5 | Data <i>Training</i> dan <i>Testing</i> yang Sipilih Secara Acak..... | 69 |
| Tabel 4.6 | Data <i>Testing</i> Pada Tebal Lapisan <i>Recast</i> , Kekasaran Permukaan dan <i>Microcrack</i> Respon Hasil Eksperimen, Hasil Pelatihan BPNN dan Error (Selisih antara Hasil Eksperimen dengan Hasil BPNN..... | 71 |
| Tabel 4.7 | Nilai MSE Data <i>Testing</i> dan MSE Total Dari Data <i>Training</i> dan Data <i>Testing</i> Pada Respon Tebal Lapisan <i>Recast</i> , Kekasaran Permukaan dan <i>Microcrack</i> | 71 |
| Tabel 4.8 | Seting Optimal Parameter-Parameter <i>Arc On Time</i> , <i>On Time</i> , <i>Open Voltage</i> , <i>Off Time</i> , dan <i>Servo Voltage</i> Pada Proses Pemesinan WEDM dengan Menggunakan Metode GA..... | 74 |





BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses pemesinan non konvensional *wire electric discharge machining* (WEDM) merupakan salah satu proses pemesinan yang digunakan untuk memotong benda kerja yang bersifat konduktor. Proses WEDM menggunakan sebuah kawat sebagai elektrodanya yang bergerak secara kontinyu memotong benda kerja. Pemotongan material terjadi sebagai hasil erosi yang diakibatkan oleh loncatan elektron yang berupa percikan listrik dari kawat elektroda ke benda kerja. Proses ini sering digunakan untuk proses pemotongan dengan hasil kepresisian yang tinggi.

Baja SKD61 merupakan salah satu jenis material yang dikenal luas pemakaiannya, yaitu pada proses pembentukan sebagai *punch* dan *dies*, pada proses pengecoran sebagian *dies* untuk *hot forging dies*, *die casting* dan *mould* serta pada proses pemesinan sebagai alat potong (*cutting tools*). Material tersebut merupakan salah satu jenis *hot work steels* yang memiliki ketangguhan dan kekerasan tinggi, dengan komponen unsur-unsur paduan utamanya adalah 0,398% C, 0,968% Si, 0,406% Mn, 0,008% S, 5,145% Cr, 1,252% Mo dan 0,920% V (Yee dkk., 2013). Pembuatan pahat potong dari material baja SKD61 dengan proses WEDM harus dilakukan sebaik mungkin agar menghasilkan tebal lapisan *recast* yang tipis, kekasaran permukaan yang rendah dan *microcrack* (retak mikro) yang kecil.

Lapisan *recast* merupakan lapisan yang terbentuk pada permukaan benda kerja sebagai akibat dari pengaruh panas yang ditimbulkan oleh loncatan bunga api dari kawat elektroda dan berwarna putih (Bagiasna, 1979). Selain itu, lapisan *recast* merupakan sisa dari lapisan utama material induk yang terkikis akibat erosi oleh kawat elektroda dan membeku dengan cepat. Lapisan ini memiliki nilai kekerasan yang berbeda dan kekerasan dari material induk, sehingga menyebabkan terjadinya ketidakhomogenan sifat mekanik. Parameter pemesinan pada proses WEDM seperti *pulse current* dan *pulse on duration* mempunyai



pengaruh terhadap tebal lapisan *recast* pada baja SKD61 dan baja SKD11. Kedua baja ini menghasilkan tebal lapisan *recast* yang berbeda. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan konduktivitas termal pada kedua baja tersebut. Faktor *pulse current* dan *pulse on duration* juga menyebabkan *surface crack* pada kedua baja tersebut (Lee dan Tai, 2003). Faktor-faktor lain seperti *off time*, *pulse current* dan *servo voltage* juga mempengaruhi terjadinya *mickrocracks*. Peningkatan *on time*, *pulse current* dan *servo voltage* akan menyebabkan peningkatan *mickrocracks*, tetapi dengan peningkatan *off time*, *mickrocracks* dapat diturunkan (Govindan dan Joshi, 2012). Selain *pulse current* dan *pulse on duration*, *duty factor* juga mempengaruhi tebal lapisan *recast* (Rao dkk., 2008). Peningkatan *duty factor* pada *pulse current* dan *pulse on duration* yang konstan akan meningkatkan tebal lapisan *recast*.

Topografi kekasaran permukaan (KP) disebabkan karena adanya *globule*, *microcrack* (retak mikro) *pockmark*, *debris*, dan kawah (*crater*). Penggunaan AN akan menghasilkan debit energi yang lebih intensif. Selain itu erosi yang terjadi akan meningkat, sehingga nilai KP akan meningkat. Selanjutnya, dengan meningkatnya ON, jumlah energi panas yang ditransfer ke permukaan benda kerja juga meningkat, sehingga material lebih banyak meleleh. Pada saat proses pembilasan (*flushing*), material yang tidak terbawa oleh cairan dielektrik akan mengeras selama proses pendinginan dan membentuk lapisan *recast*. Efek dari lapisan *recast* ini adalah terjadinya peningkatan kekasaran permukaan. Pada saat *off time* tidak hanya terjadi *flushing*, tetapi juga terjadi ionisasi cairan dielektrik yang bertujuan untuk mempersiapkan jalur lompatan busur listik (Rupajati, 2013). Oleh karena itu, kekasaran permukaan yang lebih rendah akan dapat diperoleh bila *off time* diseting dengan nilai yang lebih besar, tetapi akibatnya proses pemotongan menjadi lebih lama.

Pembentukan dari retak mikro pada dasarnya terjadi karena adanya pendinginan dan pemanasan yang cepat oleh cairan dielektrik. Proses pendinginan dan pemanasan telah meningkatkan tegangan luluh dan material terdeformasi secara plastis selama pemanasan. Hal ini akan menyebabkan terjadinya tegangan tarik yang mengawali pembentukan retak mikro (Kumar dan Singh, 2012).



Studi tentang pengaruh parameter pada proses WEDM terhadap respon kekasaran permukaan benda kerja dan laju pengerjaan bahan dilakukan dengan memvariasikan parameter-parameter *pulse on time*, *pulse off time*, *open voltage*, *feed rate over ride*, *wire feed*, *servovoltage*, *wire tension* dan *flushing pressure* (Kumar dan Singh, 2012). Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode Taguchi dan menggunakan rancangan percobaan *orthogonal array* L_{18} . Material dan kawat yang digunakan adalah baja SKD61 dan kawat kuningan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter-parameter *on time*, *open voltage*, *wire tension*, dan *servo voltage* mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kedua respon yang diamati.

Penelitian dengan berbagai pendekatan dilakukan untuk menentukan nilai parameter proses pada mesin WEDM. Penelitian yang membandingkan beberapa metode seperti model matematika, metode Taguchi, *artificial neural networks* (ANN), *fuzzy logic*, *genetic algorithm* (GA), *finite element method* (FEM), *non linear modeling*, *responses surface methodology* (RSM), *linear regression analysis*, *grey rational analysis* (GRA), dan *principle component analysis* (PCA) telah dilakukan oleh Bharti dan Khan (2010). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode ANN dan GA adalah metode baru yang sedang berkembang, banyak digunakan, dan menjanjikan dalam menentukan variabel proses pada mesin WEDM.

Algoritma pembelajaran yang umum digunakan adalah *backpropagation neural network* (BPNN), tetapi algoritma ini memiliki banyak kelemahan. Kelemahan-kelemahan BP diantaranya hanya bagus dalam aplikasi tertentu (Zhao dkk., 2005), sering terjebak pada lokal minimum, membutuhkan waktu yang lama untuk mencapai konvergen dan memiliki kemampuan yang rendah dalam belajar sehingga menghasilkan output yang tidak akurat (Cheng dkk., 2009).

Kinerja BPNN dipengaruhi oleh arsitektur *neural network* (jumlah *layer* dan unit) dan algoritma pembelajaran. Tidak ada ketentuan yang pasti dalam menentukan setting arsitektur *neural network*, tetapi dengan jumlah *layer* dan unit dari arsitektur yang terlalu kecil mengakibatkan BPNN tidak mampu belajar dan menghasilkan solusi terbaik. Bila ukuran arsitektur yang digunakan



terlalu besar, BPNN akan bersifat lambat dalam proses generasi lisasi dan membutuhkan waktu yang banyak dalam proses *training* (Chee dkk., 2011).

Banyak penelitian yang telah dikembangkan untuk memperbaiki kelemahan BPNN, diantaranya menggunakan metode *particle swarm optimization* (PSO) dan GA. Pelatihan BPNN dengan menggunakan metode PSO membutuhkan sedikit parameter dan membutuhkan waktu yang lebih cepat untuk mencapai konvergen (Andres dkk., 2011). Metode PSO memiliki kelemahan dalam melakukan pencarian nilai optimal lokal. Pada proses optimasinya sering terjadi *premature convergent* (konvergen pada solusi optimum lokal) karena memiliki ruang pencarian yang terbatas (Suyanto, 2008). Peramalan BPNN dengan menggunakan metode GA menghasilkan kondisi yang lebih baik dari pada menggunakan metode PSO. Kelebihan metode GA dalam melakukan optimasi dikarenakan adanya faktor probabilitas *mutation* dan *crossover*. Parameter-parameter tersebut menyebabkan ruang pencarian solusi optimasi GA lebih besar untuk menghasilkan solusi optimal global (Zhang dkk., 2013). Adapun kelemahan yang dimiliki pada metode GA adalah proses optimasi membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai kondisi konvergen. Selain itu, pada pemilihan nilai dan fungsi *crossover* yang tidak tepat akan mengakibatkan nilai optimal global tidak tercapai secara cepat dan tepat (Ahmad dkk., 2010).

Penelitian untuk mendapatkan nilai optimum dari respon-respon *accuracy*, *surface roughness* dan *volumetric material removal rate* dilakukan dengan menggunakan parameter-parameter proses *on time*, *off time*, *arc on time* dan *servo voltage* (Ugrasen dkk., 2014). Rancangan percobaan tersebut ditetapkan dengan menggunakan metode Taguchi yang berupa matriks ortogonal L_{16} dan replikasi sebanyak dua kali. Metode optimasi yang digunakan adalah *back propagation neural network* (BPNN) dan fungsi aktivasi *Levenberg Marquardt algorithm* (LMA). Data hasil eksperimen tersebut dijadikan data input pada optimasi BPNN, dan akan dikelompokkan menjadi data *training*, data *testing* dan data validasi dengan persentase data standar sebesar secara berurutan 60:20:20, serta dipilih secara random. Pada penelitian tersebut diperoleh kesimpulan bahwa optimasi BPNN dengan menggunakan persentase data *training* sebesar 70% menghasilkan



nilai *mean square error* (MSE) yang lebih kecil dari pada menggunakan persentase data *training* sebesar 50% dan 60%.

Penelitian dengan metode *response surface methodology* (RSM) dan GA digunakan untuk mencari nilai kekasaran permukaan minimum pada parameter-parameter *on time*, *off time*, *wire feed rate* dan *servo voltage* (Shandilya dan Jain, 2012). Dari penelitian ini diperoleh kesimpulan bahwa nilai eror absolut antara nilai hasil eksperimen dengan nilai prediksi kekasaran permukaan dengan menggunakan metode GA hanya sebesar 3,57%.

Penelitian yang akan dilakukan ini bertujuan untuk menentukan seting dari parameter WEDM *arc on time*, *on time*, *open voltage*, *off time*, dan *servo voltage* untuk menghasilkan respon-respon tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcracks* yang minimum pada material baja SKD61. Metode optimasi yang digunakan adalah *backpropagation neural network* (BPNN) dan *genetic algorithm* (GA).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka dapat ditetapkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana arsitektur jaringan *backpropagation neural network* (BPNN) dan *genetic algorithm* (GA) yang tepat untuk memprediksi tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* pada proses pemesinan WEDM dengan parameter-parameter proses *arc on time*, *on time*, *open voltage*, *off time*, dan *servo voltage*.
2. Bagaimana pengaturan yang tepat dari parameter-parameter proses tersebut pada proses pemesinan WEDM agar dapat meminimumkan tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack*.

1.2.1 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberlakukan agar penelitian dapat berjalan secara terarah dan dapat mencapai tujuan yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Tidak membahas sistem elektronika, sistem kontrol, dan pemrograman CNC yang digunakan pada proses pemesinan.



2. Tidak membahas komponen biaya pada proses pemesinan.
3. Retakan di dalam *blowholes* tidak diukur.

1.2.2 Asumsi Penelitian

Asumsi yang diberlakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Faktor-faktor yang tidak diteliti dianggap konstan dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil penelitian.
2. Faktor interaksi tidak digunakan dalam penelitian ini.
3. Sifat mekanik dan komposisi kimia material yang digunakan homogen.
4. Mesin bekerja dalam kondisi baik selama proses pemesinan.
5. Alat ukur yang digunakan selama proses pemesinan layak dan terkalibrasi.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian berdasarkan rumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Membuat arsitektur jaringan *backpropagation neural network* (BPNN) dan *genetic algorithm* (GA) yang tepat untuk memprediksi tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* pada proses pemesinan WEDM dengan parameter-parameter proses *arc on time*, *on time*, *open voltage*, *off time*, dan *servo voltage*.
2. Menentukan pengaturan yang tepat dari parameter-parameter proses tersebut pada proses pemesinan WEDM agar dapat meminimumkan tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah *database* tentang pengaturan seting faktor pada proses pemesinan WEDM untuk mengoptimasi tebal lapisan *recast* dan kekasaran permukaan, serta pengaruhnya terhadap *microcrack* pada benda kerja.
2. Sebagai bahan referensi dan penelitian selanjutnya untuk mengembangkan tentang optimasi tebal lapisan *recast* dan kekasaran permukaan benda kerja, serta pengaruhnya terhadap *microcrack* pada benda kerja.



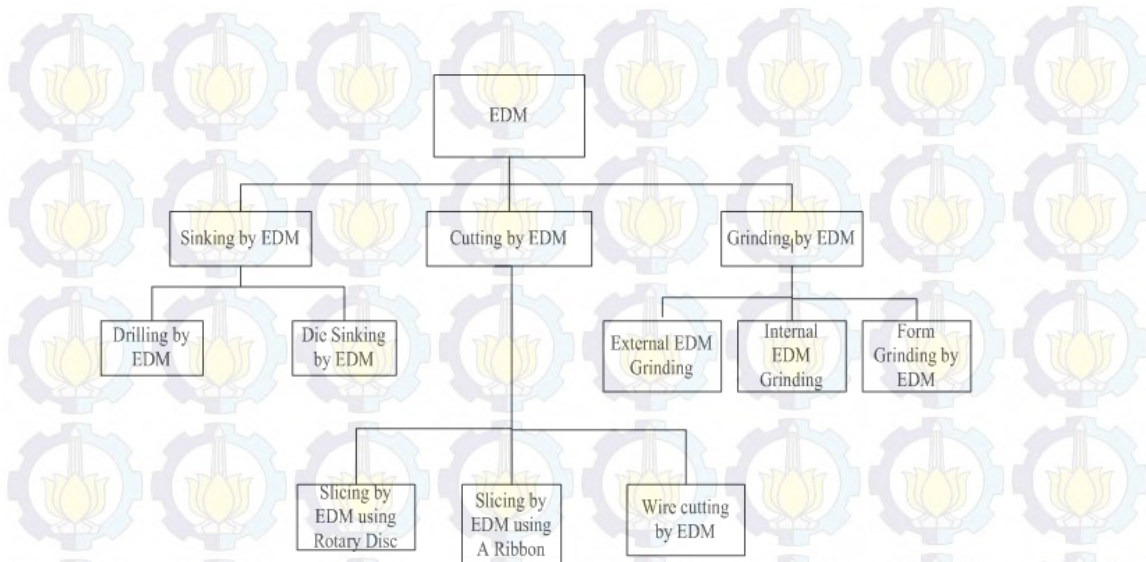
BAB II DASAR TEORI

2.1 Proses Pemessinan EDM

Salah satu proses pemessinan yang paling banyak digunakan di industri adalah *electrical discharge machining* (EDM). Proses EDM merupakan proses pengerjaan material oleh loncatan bunga api listrik diantara dua elektroda, yaitu elektroda benda kerja dan elektroda pahat yang memanfaatkan aliran cairan dielektrik selama proses berlangsung. Proses pengerjaan material pada proses pemessinan EDM dilakukan dengan memanfaatkan energi termal. Beberapa keunggulan yang dimiliki proses pemessinan EDM adalah sebagai berikut (Pandey dan Shan, 1980):

- Benda kerja tidak mengalami *chatter* dan deformasi mekanik karena tidak terdapat kontak fisik antara benda kerja dan pahat.
- Mampu mengerjakan bentuk benda kerja yang kompleks dan terbuat dari material yang sangat konduktif, keras dan tangguh dengan derajat kepresisian dan kualitas permukaan yang sangat tinggi.
- Hampir semua pekerjaan yang dilakukan pada mesin konvensional biasa dapat dilakukan dengan proses ini.
- Distribusi kawah kecil yang dihasilkan tidak akan menurunkan kekuatan lelah benda kerja yang cukup besar.
- Proses dapat dijalankan secara otomatis sehingga faktor operator dalam menghasilkan kualitas benda kerja dapat diabaikan.

Proses pemessinan EDM dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.1 sebagai berikut (Pandey dan Shan, 1980):



Gambar 2.1 Klasifikasi proses pemesinan EDM

2.2 Proses Pemesinan wire *electrical discharge machining* (WEDM)

Proses pemesinan WEDM merupakan proses yang dimulai dengan cara menghubungkan catu daya pada kawat elektroda yang memiliki diameter tertentu dengan benda kerja yang berada pada cairan dielektrik (Sommer dan Sommer, 2005). Kawat elektroda dan benda kerja dihubungkan pada kutub yang berlawanan. Pada umumnya, kawat elektroda dihubungkan pada kutub negatif dan benda kerja dihubungkan pada kutub positif. Proses pengerjaan material dilakukan oleh sejumlah loncatan bunga api listrik yang terjadi diantara celah benda kerja dan elektroda. Bunga api listrik akan meloncat dari kawat elektroda yang merupakan kutub negatif menuju benda kerja yang merupakan kutub positif. Bunga api listrik tersebut tidak terjadi secara kontinyu, tetapi periodik terhadap waktu. Prinsip dasar proses WEDM ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Prinsip dasar proses WEDM

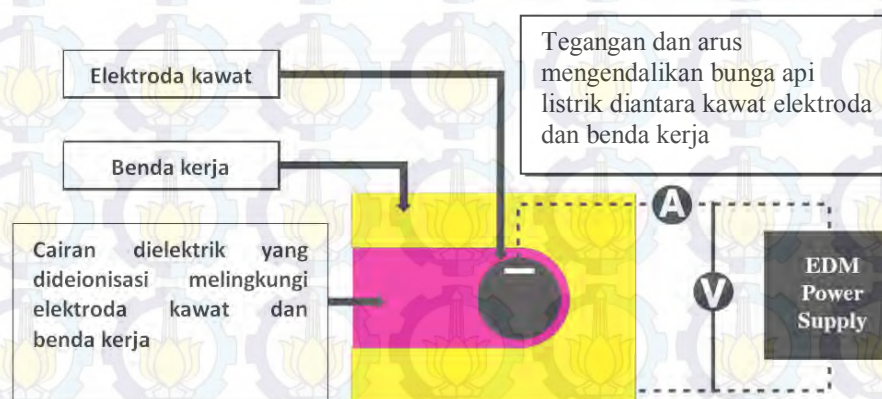


2.2.1 Mekanisme Proses WEDM

Pada proses WEDM, setiap loncatan bunga api listrik dengan energi yang tinggi akan menumbuk benda kerja, sehingga menyebabkan terjadinya perubahan energi listrik menjadi energi panas. Hal ini menyebabkan permukaan benda kerja maupun elektroda akan mengalami kenaikan temperatur sekitar 8000 °C hingga 12000°C (Bagiasna, 1979). Kenaikan temperatur tersebut cukup membuat benda kerja dan elektroda meleleh dan mengakibatkan terjadinya penguapan. Hal ini akan menimbulkan gelembung udara yang akan terus mengembang sesuai dengan kenaikan suhu yang terjadi. Pelelehan dan penguapan yang terjadi pada benda kerja jauh lebih tinggi daripada pelelehan dan penguapan yang terjadi pada elektroda. Setelah terjadi loncatan bunga api listrik, aliran listrik akan terhenti sesaat memasuki *off time*. Hal ini akan menyebabkan perubahan temperatur yang mendadak, sehingga lelehan benda kerja dan elektroda akan membeku dengan cepat. Selain itu, gelembung gas akan meledak dan terpengar keluar sehingga meninggalkan kawah-kawah halus pada permukaan material. Hasil pembekuan itulah yang akan dibawa keluar oleh cairan dielektrik.

Penjelasan secara sederhana mengenai urutan proses pengerjaan material pada WEDM diilustrasikan pada Gambar 2.3 hingga Gambar 2.6 sebagai berikut (Sommer dan Sommer, 2005):

Langkah 1: Tegangan dan arus listrik dihasilkan dari kawat yang dikelilingi oleh air deionisasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Pembangkitan tegangan dan arus listrik oleh catu daya

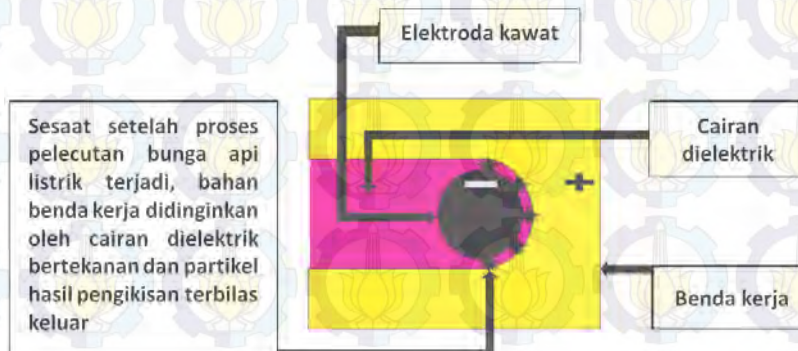


Langkah 2: *On time* mengendalikan bunga api yang dihasilkan oleh elektroda kawat dan benda kerja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



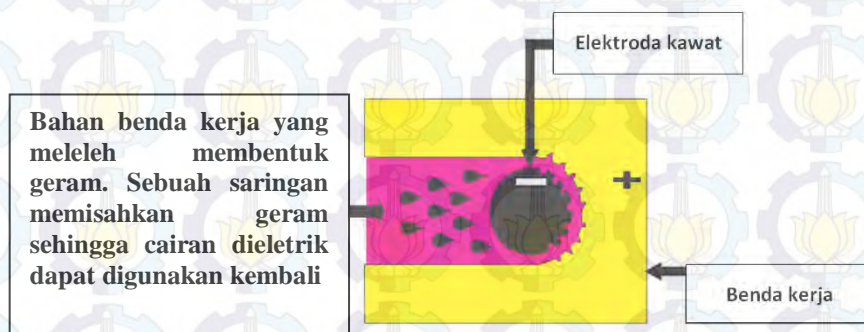
Gambar 2.4 Pengikisan material oleh bunga api listrik saat *on time*

Langkah 3: Selama *off time*, cairan dielektrik bertekanan membilas material dari partikel hasil pengikisan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Proses pengikisan material yang berhenti saat *off time*

Langkah 4: Sistem saringan digunakan untuk membilas partikel dari cairan dielektrik dan cairan tersebut digunakan kembali seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Pembilasan geram oleh cairan dielektrik



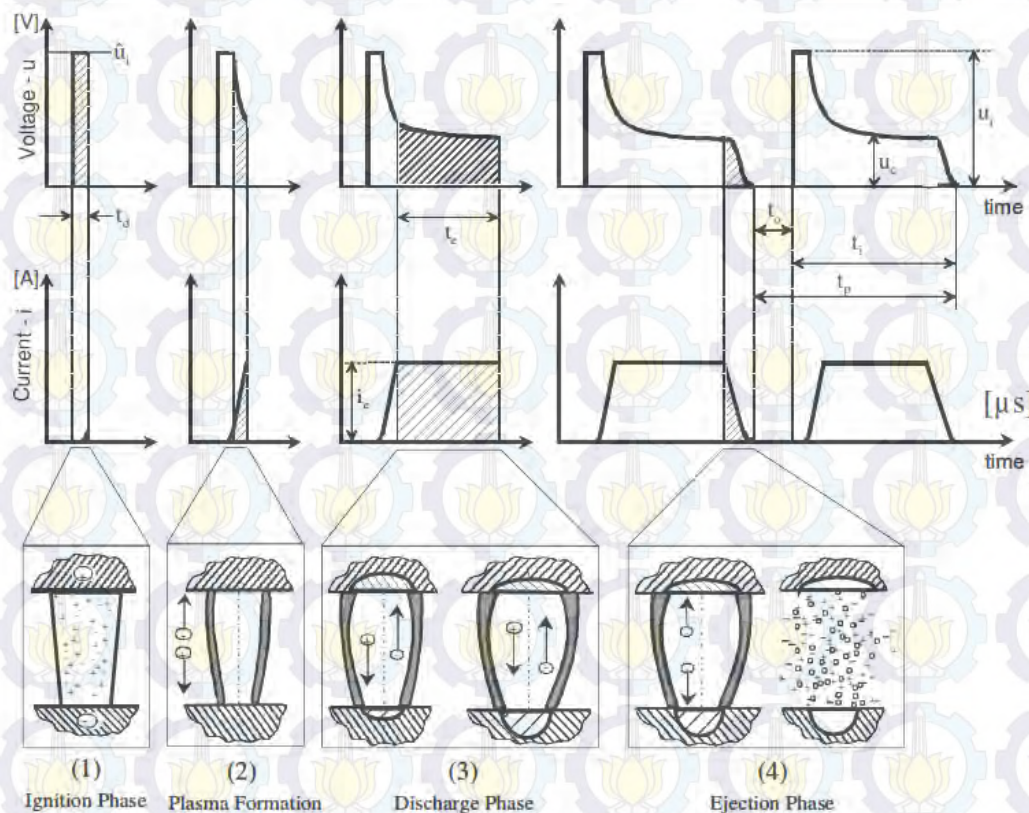
Lamanya nyala bunga api listrik ini sangat tergantung pada besarnya muatan yang mengisi kapasitor. Jika muatan pada kapasitor besar, maka *spark* yang terjadi lebih lama, sehingga lebih banyak material dari benda kerja yang mampu dilelehkan dan diuapkan. Dengan demikian untuk setiap percikan bunga api listrik yang lebih lama nyalanya akan terjadi kawah (*crater*) yang lebih dalam dan lebih lebar. Periode waktu nyala bunga api listrik ini kemudian lebih dikenal dengan *arc on time*, sedangkan periode waktu saat pengisian kapasitor hingga mencapai *breakdown voltage* disebut sebagai *charging time* dan saat ini tidak timbul bunga api listrik sehingga dikenal sebagai *arc off time*. Besar kecilnya percikan bunga api listrik ini dapat diatur dengan memvariasikan tegangan dari catu daya (*power supply*). Semakin tinggi tegangan yang diberikan, maka semakin besar juga *spark gap* yang digunakan untuk mencapai *breakdown voltage* yang lebih besar akibatnya percikan bunga api listrik yang terjadi juga lebih besar. Konsekuensinya adalah kawah yang lebar dan dalam akan terbentuk dan berakibat kekasaran permukaan hasil pemesinan menjadi kasar, namun produktivitas menjadi semakin besar, sehingga cocok untuk proses pengkasaran (Suharjono, 2004).

Secara komparatif pengurangan material terkikis pada proses EDM dari katoda (kawat) dibandingkan dengan anoda (benda kerja) adalah sebagai berikut (Pande dan Shan, 1985):

1. Momentum ion positif menumbuk permukaan katoda jauh lebih kecil dari pada momentum aliran elektron menumbuk permukaan anoda. Berdasarkan hukum kekekalan momentum, maka massa elektron yang lebih kecil dari pada massa ion positif mengakibatkan kecepatan elektron untuk menumbuk anoda menjadi lebih besar. Jumlah elektron dalam aliran elektron tersebut berjumlah lebih banyak dari pada jumlah ion positif yang menumbuk katoda.
2. Gaya tekanyang dihasilkan akibat percikan listrik pada permukaan katoda dapat mengurangi keausan kawat. Percikan listrik terjadi di permukaan kawat dan mengakibatkan tekanan di permukaan katoda menjadi lebih besar. Tekanan tersebut mengakibatkan kecepatan ion positif yang menumbuk katoda menjadi lebih kecil sehingga impuls yang dihasilkan menjadi kecil.



Proses erosi pada permukaan elektroda dipengaruhi oleh parameter-parameter yaitu antara lain: polaritas, konduktivitas panas elektroda, titik leleh, interval waktu dan intensitas dari loncatan bunga api listrik. Parameter-parameter tersebut diseting untuk memperoleh nilai persen erosi pada permukaan benda kerja adalah sebesar 99,5% dan permukaan elektroda adalah sebesar 0,5%. Kondisi tersebut dikenal dengan istilah erosi asimetris. Proses erosi tersebut disebabkan karena kecepatan tumbukan oleh ion-ion positif terhadap katoda lebih rendah dari pada kecepatan tumbukan oleh elektron-elektron terhadap anoda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Total energi tumbukan seluruh elektron adalah lebih besar dibandingkan dengan energi tumbukan oleh ion-ion.



Gambar 2.7 Proses erosi asimetris (Amorim dan Weingaetner, 2007)

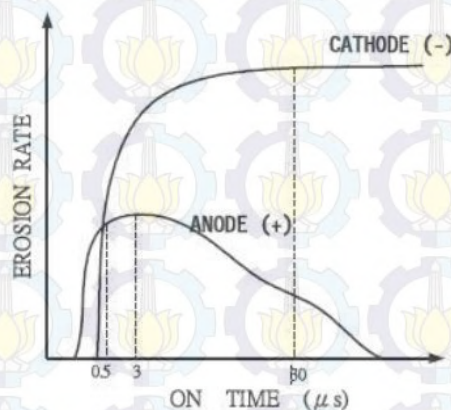
Notasi-notasi yang digunakan pada Gambar 2.7 adalah sebagai berikut:

- \hat{i}_e = discharge current, A
- t_p = pulse cycle time, ms
- p_{in} = dielectric inlet pressure, MPa
- u_e = discharge voltage, V
- t_d = ignition delay time, ms



- \hat{u}_i = open circuit voltage, V
 t_e = discharge duration, ms
 V_e = electrode wear rate, mm³/min
 t_i = pulse duration, ms
 V_w = material removal rate, mm³/min
 t_0 = pulse interval time, ms

Hubungan antara laju erosi anoda atau katoda dan *on time* itu digambarkan secara skematis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Laju erosi katoda lebih rendah dari laju erosi anoda dengan *on time* lebih kecil, yaitu sebesar $T_{on} < 0,5 \mu s$. Sedangkan nilai *on time* diantara interval 0,5-30 μs , laju erosi katoda lebih besar dari pada laju erosi anoda. Pada interval tersebut kawah percikan tunggal yang dihasilkan pada permukaan katoda akan lebih besar dari pada di permukaan anoda. Oleh karena itu, pulsa menghasilkan sirkuit yang digunakan dalam penelitian ini memilih pulsa DC yang menghasilkan rangkaian dari polaritas positif untuk mengatur kawat sebagai anoda.

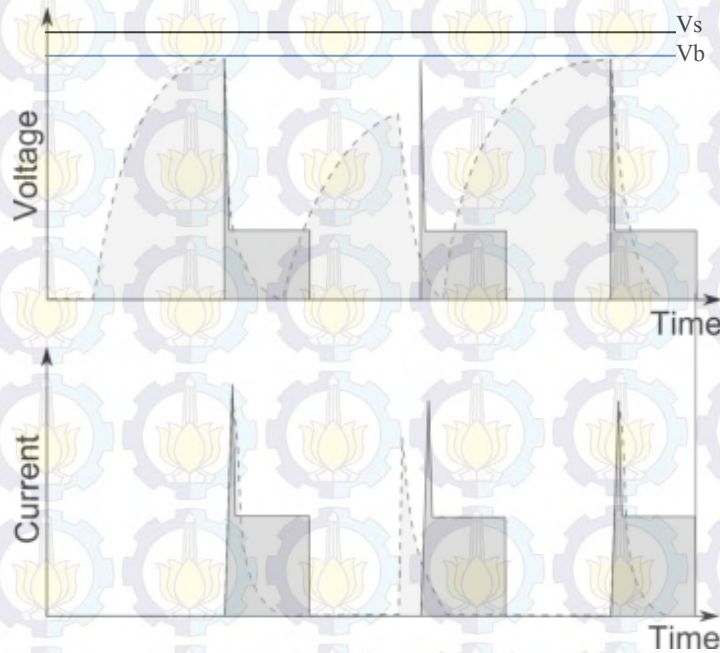


Gambar 2.8 Laju erosi anoda dan katoda terhadap *on time*

Gambar 2.8 menunjukkan diagram pengisian (*charging*) dan pelepasan (*discharging*) pada proses WEDM. Loncatan bunga api listrik terjadi, apabila tegangan kapasitor sama dengan tegangan *break down voltage* (V_b) dielektrik. Setelah *discharge*, kapasitor diisi ulang dan siklus terjadi pengulangan seperti yang ditunjukkan Gambar 2.8. Nilai servo meter diperbesar yang berarti celah antara elektroda benda kerja (*spark gap*) menjadi lebih sempit yang berakibat menurunkan *break down voltage* (V_b) serta memperpendek waktu ionisasi dari



dielektrik dan mempertinggi aliran arus listrik rata-rata untuk proses pengerjaan (*average machine current*).



Gambar 2.9 Diagram pengisian (*charging*) dan pelepasan (*discharging*)

Notasi-notasi yang digunakan pada Gambar 2.9 adalah sebagai berikut:

V_s = Tegangan *power supply* untuk mengisi kondensor C (volt)

V_b = Tegangan *break down* pada celah dielektrik.

Waktu sela (*interval time*) merupakan waktu untuk melakukan pengisian kapasitor dan pendinginan. *Interval time* tidak tergantung pada polaritas dan material dari penda kerja maupun elektroda. Bila *interval time* yang lebih singkat, maka keausan elektroda menjadi lebih kecil. Nilai *interval time* diatur dengan mensetting nilai tahanan (R) yang digunakan pada rangkaian kapasitor. Perubahan nilai tahanan pada sirkuit pengisian akan mengubah waktu pengisian kapasitor dan frekuensi loncatan bunga api.



2.2.2 Parameter Proses WEDM

Beberapa faktor pada proses WEDM (*Instruction Manual Book Wire-EDM CHMERCW32GF*) adalah sebagai berikut:

1. *Open voltage* (OV)

Open voltage adalah faktor yang mengatur perbedaan tegangan antara benda kerja dan kawat elektroda selama proses pemesinan.

2. *Low Power* (LP)

Low power merupakan faktor yang mengatur jenis sumber energi pemotongan (AC atau DC) dan besarnya energi tersebut.

3. *On time* (ON) dan *off time* (OFF)

Loncatan bunga api listrik harus terjadi selama *on time* dan harus berhenti selama *off time* secara bergantian pada saat proses pemesinan *wire-EDM* berlangsung. Pada saat *on time*, timbul tegangan listrik pada celah antara benda kerja dan kawat elektroda yang menghilang saat *off time*. Oleh karena itu, proses hanya terjadi saat *on time* saja.

4. *Arc on time* (AN) dan *arc off time* (AFF)

Arc on time adalah waktu yang mengatur selama arus tambahan, sedangkan *arc off time* adalah waktu yang mengatur arus tambahan tersebut berhenti.

5. *Servo voltage* (SV)

Servo voltage adalah tegangan yang diberikan untuk menghindari hubungan singkat yang mungkin terjadi dan dilakukan dengan mengatur jarak antara kawat elektroda dan benda kerja.

6. *Feedrate override* (FR)

Feedrate override adalah faktor yang digunakan untuk menyesuaikan kecepatan pemakanan yang digunakan.

7. *Wire feed* (WF) dan *wire tension* (WT)

Wire feed adalah faktor yang digunakan untuk mengatur kecepatan pemakanan kawat elektroda, sedangkan *wire tension* adalah faktor yang digunakan untuk mengatur ketegangan kawat elektroda.



8. *Water flow* (WL)

Water flow adalah faktor yang digunakan untuk mengatur tekanan *flushing* dari *upper* dan *lower nozzle*.

9. *Feedrate mode* (FM) dan *feedrate* (F)

Feedrate mode adalah faktor yang digunakan untuk memilih kecepatan pemakanan servo atau kecepatan pemakanan konstan, sedangkan *feedrate* adalah faktor yang digunakan untuk menentukan kecepatan pemakanan yang konstan.

2.2.3 Jenis-jenis Elektroda Kawat

Pemilihan jenis kawat pada dasarnya tergantung pada sifat fisik dan mekanis dari benda kerja, namun kawat elektroda yang ideal harus memiliki karakteristik seperti konduktivitas listrik yang baik dan kekuatan mekanik yang baik (kekuatan tarik, *elongation*, dan lain-lain). Jenis-jenis kawat elektroda yang biasa digunakan adalah (Guitrau, 1997):

1. Elektroda kawat tembaga

Elektroda kawat tembaga merupakan kawat elektroda yang digunakan pertama kali pada proses WEDM. Kawat elektroda ini memiliki beberapa kekurangan yaitu memiliki kekuatan tarik yang rendah dan sangat mudah menyerap panas pada proses pemotongan.

2. Elektroda kawat kuningan

Elektroda kawat kuningan merupakan paduan dari tembaga (Cu) dan seng (Zn). Pada umumnya, elektroda ini memiliki presentase Zn yang tinggi yang baik untuk proses pemesinan WEDM. Kelebihan yang dimiliki kawat elektroda kawat kuningan ini adalah mempunyai kekuatan tarik yang tinggi dibandingkan kekuatan tarik dari tembaga, kekerasan tinggi dan suhu penguapan rendah.

3. Elektroda kawat berpelapis

Banyak kawat elektroda khusus yang digunakan untuk mengerjakan benda kerja dengan karakteristik tertentu. Kawat elektroda tersebut antara lain:



a. *Coated copper core wire*

Kawat elektroda ini cocok untuk proses pemesinan dengan kecepatan pemotongan yang tinggi dan benda kerja yang tebal. Akan tetapi, kekasaran permukaan yang dihasilkan oleh kawat elektroda ini besar.

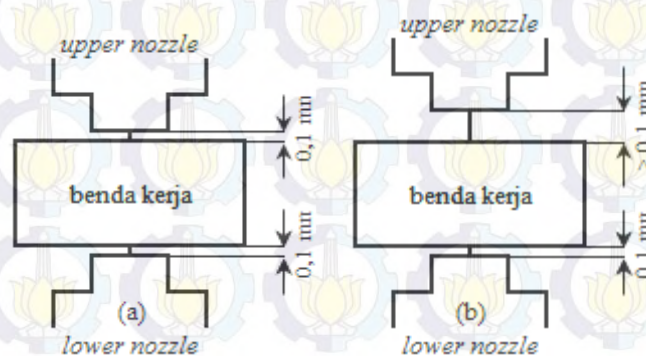
b. *Coated brass core wire*

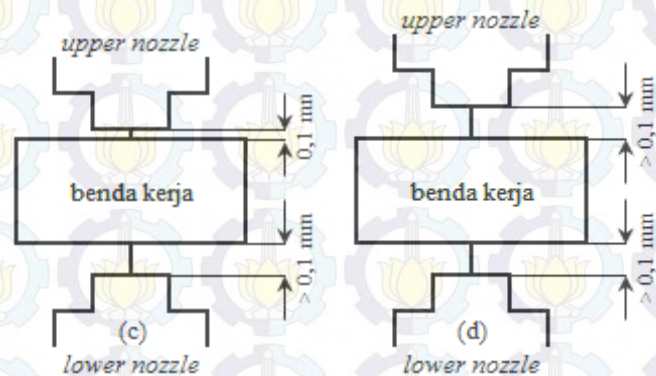
Kawat elektroda ini cocok untuk proses pemesinan berbagai jenis material, termasuk karbida.

2.2.4 Pembilasan geram (*flushing*)

Pembilasan geram adalah pembuangan geram yang dihasilkan saat proses pemesinan pada WEDM (Sommer dan Sommer, 2005). Proses ini dilakukan oleh cairan dielektrik yang mengalir diantara celah benda kerja dan elektroda. Pembilasan geram yang tidak sempurna akan menyebabkan penimbunan geram yang dihasilkan. Penimbunan geram tersebut akan menyebabkan loncatan bunga api menjadi tidak teratur sehingga merusak benda kerja dan elektroda. Selain itu, penimbunan geram akan menyebabkan hubungan singkat antara benda kerja dan elektroda.

Ada empat tipe metode pembilasan geram yang dikenal, yaitu *close contact machining*, *one side (upper) open clearance machining*, *one side (bottom) open clearance machining*, dan *open contact machining*. Ilustrasi dari keempat tipe metode pembilasan geram tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.10 (Sommer dan Sommer, 2005).





Gambar 2.10 Metode pembilasan gerampada proses WEDM: a. *close contact machining*, b. *one side (upper) open clearance machining*, c. *one side (bottom) open clearance machining*, d. *open contact machining*

Kepresisian dari permukaan benda kerja hasil permotongan yang halus dapat dilakukan dengan menggunakan metode pembilasan geram tipe *open contact machining*. Metode ini dapat menghasilkan kekasaran permukaan aritmatika hingga $0,32 \mu\text{m}$. Akan tetapi, metode ini tidak dianjurkan untuk mengerjakan material yang memiliki ketebalan melebihi 70 mm.

2.3 Parameter Respon Eksperimen

2.3.1 Lapisan Recast

Lapisan *recast* adalah lapisan putih pada permukaan benda kerja yang terbentuk akibat pengaruh panas yang ditimbulkan oleh loncatan bunga api listrik (Guitrau, 1997). Lapisan *recast* merupakan bagian benda kerja (material induk) yang ikut meleleh kemudian membeku kembali dan membentuk lapisan baru pada permukaan benda kerja. Lapisan *recast* tidak mungkin dihilangkan dalam proses pemesinan WEDM sehingga pengaturan parameter-parameter yang ada hanya dapat meminimalkan ketebalan lapisan *recast* yang terbentuk.

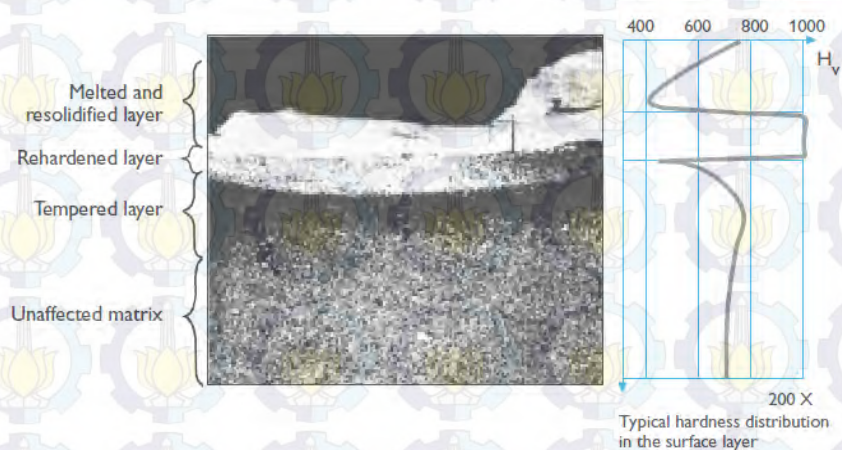
Benda kerja yang mengalami proses pemesinan dengan WEDM memiliki kekerasan yang tidak lagi homogen. Hal ini terjadi karena pada benda kerja terbentuk tiga lapisan baru dengan karakteristik yang berbeda-beda. Ketiga lapisan ini adalah lapisan *recast*, *heat affected zone* (HAZ), dan material induk.

Gambar 2.11 menunjukkan distribusi kekerasan pada benda kerja hasil proses pemesinan dengan WEDM. Struktur paling atas dari lapisan permukaan



benda kerja hasil pemotongan adalah lapisan yang mencair dan membeku kembali (*melted and resolidified layer*) dengan cepat akibat dari proses pembilasan. Lapisan ini juga biasa disebut lapisan *recast* (Uddeholm, 2007). Kedua lapisan ini termasuk dalam lapisan HAZ. Lapisan ini juga terpengaruh panas tetapi tidak sampai mencair, kemudian mengalami pengerasan kembali (Uddeholm, 2007).

Lapisan *recast* dan HAZ telah mengalami perubahan struktur kristal karena pengaruh panas selama proses pemesinan berlangsung. Hal ini menyebabkan struktur kristal baru yang terbentuk berbeda dengan struktur kristal material induk sehingga bersifat sangat keras dan getas. Sifat getas pada pahat potong dapat menyebabkan pahat potong menjadi cepat aus dan rusak bahkan dapat menimbulkan retak (*crack*).



Gambar 2.11 Distribusi kekerasan masing-masing lapisan pada benda kerja hasil WEDM (Uddeholm, 2007).

Parameter-parameter yang digunakan untuk meminimalkan tebal lapisan *recast* adalah parameter-parameter yang mempengaruhi HAZ. Hal ini dapat dilakukan karena lapisan *recast* juga merupakan bagian dari HAZ. Kedalaman HAZ dan lapisan *recast* dipengaruhi oleh arus, jenis *power supply*, dan jumlah *skim cutting* (Sommer dan Sommer, 2005). Jenis *power supply* yang dapat meminimalkan HAZ adalah DC *power supply*. Walaupun parameter-parameter yang digunakan untuk meminimalkan ketebalan lapisan *recast* adalah parameter-parameter yang mempengaruhi HAZ, proses pengukuran dan optimasi hanya dilakukan pada ketebalan lapisan *recast*. Hal ini dilakukan karena lapisan



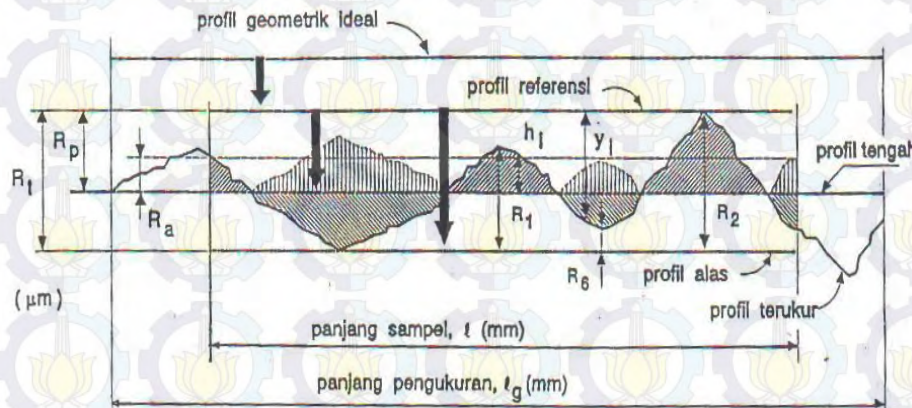
Kekasaran permukaan didefinisikan sebagai ketidakteraturan konfigurasi permukaan pada suatu benda atau bidang. Kekasaran rata-rata aritmatika dari garis rata-rata profil merupakan penyimpangan rata-rata aritmatika adalah nilai rata-rata dari ordinat-ordinat profil efektif garis rata-ratanya. Profil efektif merupakan garis bentuk dari potongan permukaan efektif oleh sebuah bidang yang telah ditentukan secara konvensional terhadap permukaan geometris ideal. Ilustrasi yang lebih jelas terhadap permukaan geometris, permukaan efektif, profil geometris dan profil efektif ditunjukkan Gambar 2.12 (Juhana dan Suratman, 2000).


$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.1)$$
$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (2.2)$$

R_a = nilai kekasaran aritmatika
 y_n = tinggi atau dalam bagian-bagian profil hasil pengukuran jarum peraba
 n = frekuensi pengukuran



l = panjang sampel yang telah ditentukan, yaitu panjang dari profil efektif yang diperlukan untuk menentukan kekasaran permukaan yang diteliti. Posisi R_a dan bentuk profil, panjang sampel, dan panjang pengukuran yang dibaca oleh alat ukur kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.13 Parameter dalam profil permukaan(Rochim, 2001)

Keterangan Gambar 2.13 adalah sebagai berikut(Rochim, 2001):

1. Profil Geometris Ideal (*Geometrically Ideal Profile*)

Profil ini merupakan profil dari geometris permukaan yang ideal yang tidak mungkin diperoleh karena banyaknya faktor yang mempengaruhi dalam proses pembuatannya. Bentuk dari profil geometris ideal ini dapat berupa garis lurus, lingkaran dan garis lengkung.

2. Profil Referensi (*Reference Profile*)

Profil ini digunakan sebagai dasar dalam menganalisis karakteristik dari suatu permukaan. Bentuk profil ini sama dengan bentuk profil geometris ideal, tetapi tepat menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur pada panjang sampel yang diambil dalam pengukuran.

3. Profil Terukur (*Measured Profile*)

Profil terukur adalah profil dari suatu permukaan yang diperoleh melalui proses pengukuran. Profil inilah yang dijadikan sebagai data untuk menganalisis karakteristik kekasaran permukaan produk pemesinan.

4. Profile Dasar (*Root Profile*)

Profil dasar adalah profil referensi yang digeserkan kebawah hingga tepat pada titik paling rendah pada profil terukur.



5. Profile Tengah (*Centre Profile*)

Profil tengah adalah profil yang berada ditengah-tengah dengan posisi sedemikian rupa sehingga jumlah luas bagian atas profil tengah sampai pada profil terukur sama dengan jumlah luas bagian bawah profil tengah sampai pada profil terukur. Profil tengah ini sebetulnya merupakan profil referensi yang digeserkan kebawah dengan arah tegak lurus terhadap profil geometris ideal sampai pada batas tertentu yang membagi luas penampang permukaan menjadi dua bagian yang sama yaitu atas dan bawah.

ISO (*International Organization for Standardization*) telah mengklasifikasi nilai kekasaran rata-rata aritmetik (R_a) menjadi 12 tingkat kekasaran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1. Angka kekasaran permukaan ini bertujuan untuk menghindari kemungkinan terjadinya kesalahan dalam menginterpretasikan satuan harga kekasaran permukaan. Dengan adanya satuan harga ini, kekasaran permukaan dapat dituliskan langsung dengan menyatakan harga R_a atau dengan menggunakan tingkat kekasaran ISO.

Tabel 2.1 Nilai Kekasaran dan Tingkat Kekasaran

| Tingkat kekasaran ISO Number | Nilai kekasaran R_a (μm) | Panjang sampel (mm) | Keterangan |
|---------------------------------|--|------------------------|--------------|
| N1 | 0.025 | 0.08 | Sangat halus |
| N2 | 0.05 | | |
| N3 | 0.1 | 0.25 | Halus |
| N4 | 0.2 | | |
| N5 | 0.4 | 0.8 | Normal |
| N6 | 0.8 | | |
| N7 | 1.6 | | |
| N8 | 3.2 | 2.5 | Kasar |
| N9 | 6.3 | | |
| N10 | 12.5 | 8 | Sangat kasar |
| N11 | 25 | | |
| N12 | 50 | | |

Sumber: Rochim, 2001

Penggunaan variabel R_a sebenarnya tidak mempunyai dasar yang kuat untuk mengidentifikasi ketidakaturan konfigurasi permukaan karena beberapa profil permukaan dapat menghasilkan nilai R_a yang hampir sama. Akan tetapi, variabel R_a cocok digunakan untuk memeriksa kualitas permukaan akhir benda kerja yang



dihasilkan dalam jumlah banyak. Variabel R_a lebih peka terhadap penyimpangan yang terjadi pada proses pemesinan bila dibandingkan dengan variabel-variabel kekasaran permukaan yang lain. Dengan demikian pencegahan akan dapat dilakukan jika muncul tanda-tanda penambahan angka kekasaran permukaan benda kerja. Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai dengan beberapa cara pengerjaan diperlihatkan oleh Tabel 2.2 (en.wikipedia.org/wiki/surfacefinish).

Tabel 2.2 Nilai kekasaran beberapa proses pengerjaan

| | $R_a \mu m$ | 50 | 25 | 12.5 | 6.3 | 3.2 | 1.6 | .8 | .4 | .2 | .1 | .05 | .025 | .012 |
|-----------------------|--------------|------|------|------|-----|-----|-----|----|----|----|----|-----|------|------|
| | $R_a \mu in$ | 2000 | 1000 | 500 | 250 | 125 | 63 | 32 | 16 | 8 | 4 | 2 | 1 | .5 |
| METAL CUTTING | | | | | | | | | | | | | | |
| sawing | | | | | | | | | | | | | | |
| planing, shaping | | | | | | | | | | | | | | |
| drilling | | | | | | | | | | | | | | |
| milling | | | | | | | | | | | | | | |
| boring, turning | | | | | | | | | | | | | | |
| broaching | | | | | | | | | | | | | | |
| reaming | | | | | | | | | | | | | | |
| ABRASIVE | | | | | | | | | | | | | | |
| grinding | | | | | | | | | | | | | | |
| barrel finishing | | | | | | | | | | | | | | |
| honing | | | | | | | | | | | | | | |
| electro-polishing | | | | | | | | | | | | | | |
| electrolytic grinding | | | | | | | | | | | | | | |
| polishing | | | | | | | | | | | | | | |
| lapping | | | | | | | | | | | | | | |
| superfinishing | | | | | | | | | | | | | | |
| CASTING | | | | | | | | | | | | | | |
| sand casting | | | | | | | | | | | | | | |
| perm mold casting | | | | | | | | | | | | | | |
| investment casting | | | | | | | | | | | | | | |
| die casting | | | | | | | | | | | | | | |
| FORMING | | | | | | | | | | | | | | |
| hot rolling | | | | | | | | | | | | | | |
| forging | | | | | | | | | | | | | | |
| extruding | | | | | | | | | | | | | | |
| cold rolling, drawing | | | | | | | | | | | | | | |
| roller burnishing | | | | | | | | | | | | | | |
| OTHER | | | | | | | | | | | | | | |
| flame cutting | | | | | | | | | | | | | | |
| chemical milling | | | | | | | | | | | | | | |
| electron beam cutting | | | | | | | | | | | | | | |
| laser cutting | | | | | | | | | | | | | | |
| EDM | | | | | | | | | | | | | | |
| | $R_a \mu m$ | 50 | 25 | 12.5 | 6.3 | 3.2 | 1.6 | .8 | .4 | .2 | .1 | .05 | .025 | .012 |
| | $R_a \mu in$ | 2000 | 1000 | 500 | 250 | 125 | 63 | 32 | 16 | 8 | 4 | 2 | 1 | .5 |

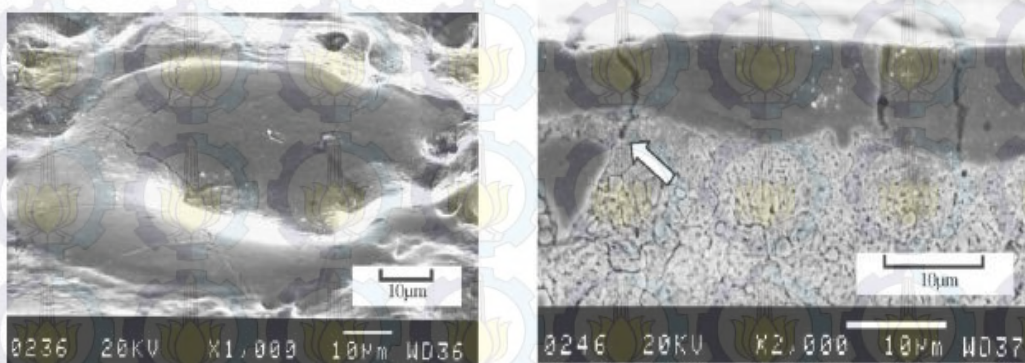
Sumber: (en.wikipedia.org/wiki/surface_finish).

KasarNormalHalus



2.3.3 Microcrack

Microcracks, *crater*, dan *microvoids* merupakan beberapa aspek dari *surface integrity*. Adanya *microcracks*, *crater*, dan *microvoids* akan menyebabkan benda kerja tidak dapat berfungsi dengan baik. Pada proses pemesinan WEDM, *microcracks* yang terjadi pada benda kerja disebabkan oleh faktor *pulse on time* dan *pulse current* (Lee dan Tai, 2003). Selain itu, konduktivitas termal yang dimiliki oleh material juga mempengaruhi terjadinya *microcracks*. Gambar 2.14 di bawah ini menunjukkan foto SEM dengan *microcracks* yang terjadi pada baja AISI D2.



(a) *microcracks* yang terjadi pada *recast layer*

(b) *microcracks* pada *recast layer* dan menyentuh material induk

Gambar 2.14 Foto SEM dari baja AISI D2 hasil proses WEDM (a) *microcracks* yang terjadi pada *recast layer* (b) *microcracks* pada *recast layer* dan menyentuh material induk.

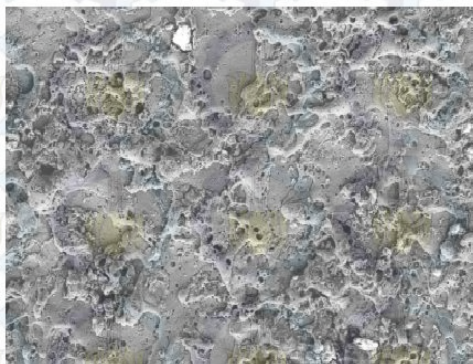
Jika suatu material dianggap dipisahkan, deviasi permukaan menunjukkan bahwa parameter-parameter WEDM yang berbeda menyebabkan kepadatan-kepadatan retakan permukaan yang berbeda. Tetapi, karena retakan permukaan adalah suatu sumber yang potensial untuk terjadinya kegagalan komponen, maka diperlukan pengkualifikasian derajat dari retakan dengan menggunakan beberapa standar yang bersifat objektif. Pengkuantifikasian dengan cara mengestimasi lebar, panjang atau kedalaman retakan atau bahkan jumlah dari retakan, tidak mudah untuk dilakukan. Oleh karena itu, Lee dan Tai (2003) mendefinisikan suatu kepadatan retakan permukaan sebagai rasio antara panjang retakan keseluruhan di penampang yang diamati dengan luas penampang yang diamati, untuk



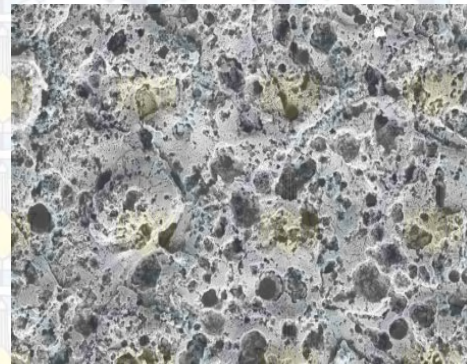
mengevaluasi seberapa parah keretakan yang terjadi. Dengan demikian, kepadatan retakan permukaan (KRP) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{KRP} = \frac{\text{Panjang retakan keseluruhan di penampang yang diamati} [\mu\text{m}]}{\text{luas penampang yang diamati} [\mu\text{m}^2]} \quad (2.3)$$

Pada proses WEDM, *crater* yang terjadi pada benda kerja disebabkan oleh temperatur yang tinggi akibat loncatan bunga api yang menumbuk benda kerja. Hal ini akan mengakibatkan benda kerja meleleh dan menguap, sehingga akan timbul *crater* pada benda kerja (Ayu, 2006). Faktor *pulse on duration* dan *pulse current* yang tinggi menyebabkan *crater* yang terjadi semakin dalam dan kekasaran permukaan benda kerja yang terjadi semakin besar. Gambar 2.15 menunjukkan *crater* hasil proses WEDM pada baja AISI 4140.



(a)kekasaran permukaan (R_a) pada $I_{on} = 1,5 \text{ A}$ dan $T_{on} = 3,2 \mu\text{s}$



(b) kekasaran permukaan (R_a) pada $I_{on} = 12,5 \text{ A}$ dan $T_{on} = 12 \mu\text{s}$

Gambar 2.15 Foto SEM pada baja AISI 4140 hasil proses WEDM

2.4 Metode Taguchi

Pada tahun 1940, Dr. Genichi Taguchi memperkenalkan metode Taguchi yang merupakan metodologi baru dalam bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses, serta bertujuan menekan biaya dan *resources* seminimal mungkin. Metode Taguchi berupaya mencapai sasaran tersebut dengan menjadikan produk dan proses tidak sensitif terhadap berbagai faktor gangguan (*noise*), seperti material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja manusia, dan kondisi-kondisi operasional (Soejanto, 2009). Metode Taguchi menjadikan produk dan proses memiliki sifat kokoh (*robust*) terhadap faktor-faktor gangguan tersebut. Oleh karena itu, metode Taguchi juga disebut perancangan kokoh (*robust design*). Metode Taguchi memiliki beberapa kelebihan



bila dibandingkan dengan metode desain eksperimen lainnya. Kelebihan-kelebihan tersebut antara lain (Soejanto, 2009):

1. Metode Taguchi lebih efisien karena dapat melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan level faktor.
2. Metode Taguchi dapat memperoleh proses yang menghasilkan produk secara konsisten dan kokoh terhadap faktor *noise* (gangguan).
3. Metode Taguchi dapat menghasilkan kesimpulan mengenai respon faktor-faktor dan level dari faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum.

Namun demikian, metode Taguchi memiliki struktur rancangan yang sangat kompleks. Metode ini juga memiliki rancangan yang mengorbankan pengaruh interaksi yang cukup signifikan. Untuk mengatasi hal tersebut, pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan secara hati-hati dan sesuai dengan tujuan penelitian.

2.4.1 Desain Eksperimen Taguchi

Desain eksperimen adalah proses mengevaluasi dua faktor atau lebih secara serentak terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu (Soejanto, 2009). Untuk mencapai hal tersebut secara efektif, maka faktor dan level faktor dibuat bervariasi kemudian hasil dari kombinasi pengujian tertentu diamati sehingga kumpulan hasil selengkapnya dapat dianalisa. Hasil analisa ini kemudian digunakan untuk menentukan faktor-faktor yang berpengaruh dan tindakan yang dapat membuat perbaikan lebih lanjut.

2.4.2 Tahap Perencanaan

Langkah-langkah pada tahap ini adalah sebagai berikut:

a. Perumusan Masalah

Perumusan masalah harus didefinisikan secara spesifik. Perumusan masalah harus jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam eksperimen yang akan dilakukan.

b. Penentuan Tujuan Eksperimen



Tujuan yang melandasi eksperimen harus dapat menjawab masalah yang telah dinyatakan pada perumusan masalah.

c. Penentuan Variabel Tak Bebas/Variabel Respon

Faktor/Variabel respon memiliki nilai yang tergantung pada faktor-faktor lain. Dalam desain eksperimen Taguchi, respon adalah karakteristik kualitas yang terdiri dari tiga kategori, yaitu:

1. Karakteristik yang dapat diukur, yaitu semua hasil akhir yang dapat diukur dengan skala kontinyu. Contohnya adalah temperatur, berat, tekanan, dan lain-lain.
2. Karakteristik atribut, yaitu semua hasil akhir yang tidak dapat diukur dengan skala kontinyu, tetapi dapat diklasifikasikan secara berkelompok. Contohnya adalah retak, jelek, baik, dan lain-lain.
3. Karakteristik dinamik, yaitu fungsi representasi dari proses yang diamati. Proses yang diamati digambarkan sebagai sinyal dan keluaran digambarkan sebagai hasil dari sinyal. Contohnya adalah sistem transmisi otomatis dengan putaran mesin sebagai masukan dan perubahan getaran sebagai keluaran.

d. Pengidentifikasian Faktor/Variabel Bebas

Faktor/variabel bebas adalah variabel yang perubahannya tidak tergantung pada variabel lain. Pada langkah ini akan dipilih faktor-faktor yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap respon yang bersangkutan. Dalam suatu eksperimen, tidak semua faktor yang diperkirakan mempengaruhi respon harus diselidiki. Dengan demikian, eksperimen dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien.

e. Pemisahan Faktor/Variabel Kontrol dan Faktor/Variabel Gangguan

Faktor-faktor yang diamati dapat dibagi menjadi faktor kontrol dan faktor gangguan. Dalam desain eksperimen Taguchi, keduanya perlu diidentifikasi dengan jelas sebab pengaruh antar kedua faktor tersebut berbeda. Faktor kontrol adalah faktor yang nilainya dapat dikendalikan, sedangkan faktor gangguan adalah faktor yang nilainya tidak dapat dikendalikan.



f. Penentuan Jumlah Level dan Nilai Level Faktor/Variabel

Pemilihan jumlah level akan mempengaruhi ketelitian hasil dan biaya pelaksanaan eksperimen. Semakin banyak level yang diteliti, maka hasil eksperimen yang diperoleh akan semakin akurat, tetapi biaya yang harus dikeluarkan akan semakin banyak.

g. Perhitungan Derajat Kebebasan

Derajat kebebasan adalah sebuah konsep untuk mendeskripsikan seberapa besar eksperimen harus dilakukan dan seberapa banyak informasi yang dapat diberikan oleh eksperimen tersebut. Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk menentukan jumlah eksperimen yang akan dilakukan untuk menyelidiki faktor yang diamati. Derajat kebebasan dari matriks ortogonal (v_{mo}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{mo} = \text{jumlah eksperimen} - 1 \quad (2.5)$$

Derajat kebebasan dari faktor dan level (v_{fl}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{fl} = \text{jumlah level faktor} - 1 \quad (2.6)$$

h. Pemilihan Matriks Ortogonal

Pemilihan matriks ortogonal yang sesuai ditentukan oleh jumlah derajat kebebasan dari jumlah faktor dan jumlah level faktor. Matriks ortogonal memiliki kemampuan untuk mengevaluasi sejumlah faktor dengan jumlah eksperimen yang minimum. Suatu matriks ortogonal dilambangkan dalam bentuk:

$$L_a(b^c) \quad (2.7)$$

dengan:

L = rancangan bujursangkar latin.

a = banyaknya eksperimen.

b = banyaknya level faktor.

c = banyaknya faktor.



Jenis matriks ortogonal yang tersedia secara standar dapat dilihat pada Tabel 2.4. Matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ merupakan matriks orthogonal standar dengan level gabungan berarti jumlah eksperimen yang akan dilakukan adalah 18. Jumlah total derajat kebebasan maksimum dari matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ adalah 17, dengan satu faktor terdiri dari dua level dan maksimal tujuh faktor masing-masing memiliki 3 level.

Tabel 2.3 Matriks Ortogonal

| 2 level | 3 level | 4 level | 5 level | Level Gabungan |
|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------------------------|
| $L_4 (2^3)$ | $L_9 (3^4)$ | $L_{16} (4^3)$ | $L_{25} (5^6)$ | $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ |
| $L_8 (2^7)$ | $L_{27} (3^{13})$ | $L_{64} (4^{21})$ | | $L_{32} (2^1 \times 4^9)$ |
| $L_{12} (2^{11})$ | $L_{81} (3^{40})$ | | | $L_{36} (2^{11} \times 3^{12})$ |
| $L_{16} (2^{13})$ | | | | $L_{36} (2^3 \times 3^{13})$ |
| $L_{32} (2^{31})$ | | | | $L_{54} (2^1 \times 3^{25})$ |
| $L_{54} (2^{63})$ | | | | $L_{50} (2^1 \times 5^{11})$ |

2.4.3 Tahap Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan meliputi penentuan jumlah replikasi dan randomisasi pelaksanaan eksperimen.

a. Jumlah Replikasi

Replikasi adalah pengulangan perlakuan yang sama dalam suatu percobaan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih tinggi, mengurangi tingkat kesalahan pada eksperimen dan memperoleh harga taksiran dari kesalahan sebuah eksperimen.

b. Randomisasi

Dalam sebuah eksperimen, ada pengaruh faktor-faktor lain yang tidak diinginkan atau tidak dapat dikendalikan, seperti kelelahan operator, fluktuasi daya mesin dan lain-lain. Pengaruh tersebut dapat diperkecil dengan menyebarkan faktor-faktor tersebut melalui randomisasi (pengacakan) urutan percobaan. Secara umum, randomisasi dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

1. Meratakan pengaruh dari faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan pada semua unit eksperimen.



2. Memberikan kesempatan yang sama pada semua unit eksperimen untuk menerima suatu perlakuan sehingga ada kehomogenan pengaruh dari setiap perlakuan yang sama.
3. Mendapatkan hasil eksperimen yang bebas satu sama lain.
4. Jikareplikasi bertujuan untuk memungkinkan dilakukannya uji signifikansi, maka randomisasi bertujuan untuk memberikan validasi terhadap uji signifikansi tersebut dengan menghilangkan sifat bias.

2.4.4 Tahap Analisis

Pada tahap ini meliputi pengumpulan data, pengaturan data dan perhitungan serta penyajian data dalam suatu tampilan tertentu yang sesuai dengan desain yang dipilih. Selain itu, juga dilakukan perhitungan dan pengujian data statistik pada data hasil eksperimen.



2.5 Metode Peramalan BPNN

BPNN merupakan proses pengolahan informasi yang terinspirasi dari sistem kerjajaringan syaraf biologis manusia. BPNN terdiri dari *input layer*, *hidden layer* dan *output layer*, dimana masing-masing *layer* memiliki sejumlah *neuron* yang saling terhubung antar *layer* dan memiliki bobot. Hasil *output* dan kesimpulan BPNN didasarkan pada pengalaman saat melakukan proses peramalan (*training*). Proses peramalan BPNN diawali dengan memberikan nilai bobot awal. Informasi yang sudah diketahui hasilnya dimasukkan ke dalam *neuron* pada *input layer*. Bobot-bobot ini digunakan untuk mengingat pola informasi yang telah diberikan. Pengaturan bobot diatur secara terus menerus sampai diperoleh hasil yang diharapkan. Tujuan peramalan BPNN adalah untuk mencapai kemampuan memanggil kembali secara sempurna sebuah pola yang telah dipelajari (memorisasi) dan menghasilkan nilai *output* yang bisa diterima terhadap pola-pola yang serupa yang disebut sebagai generalisasi (Puspitaningrum, 2006).

Hal yang mempengaruhi kinerja peramalan BPNN adalah penentuan arsitektur BPNN dan algoritma pembelajaran. Tidak ada ketentuan yang pasti dalam menentukan arsitektur BPNN, tetapi ukuran arsitektur yang terlalu kecil berakibat peramalan BPNN tidak mampu belajar dan sebaliknya ukuran arsitektur yang terlalu besar akan bersifat lemah dalam *generalisasi* dan memakan banyak waktu peramalan BPNN (Chee, 2011).

Kelemahan-kelemahan peramalan BPNN diantaranya baik dalam aplikasi tertentu (Zhao, 2005), sering terjebak pada lokal minimum, membutuhkan waktu yang lama untuk mencapai konvergen dan memiliki kemampuan yang rendah dalam belajar sehingga menghasilkan output yang tidak akurat (Cheng, 2009).

Banyak penelitian yang telah dikembangkan untuk memperbaiki kelemahan peramalan BPNN beberapa diantaranya menggunakan metode *particle swarm optimization* (PSO) dan *genetic algorithm* (GA). Peramalan BPNN menggunakan PSO membutuhkan sedikit parameter dan membutuhkan waktu yang lebih cepat untuk mencapai konvergen (Andres, 2011), tetapi lemah dalam pencarian optimum lokal dan sering terjadi *premature convergent* (konvergen pada solusi optimum lokal) karena memiliki ruang pencarian yang



terbatas (Suyanto, 2008). Peramalan BPNN dengan menggunakan metode GA menghasilkan kondisi yang lebih baik dari pada menggunakan metode PSO. Kelebihan metode GA dalam melakukan optimasi dikarenakan adanya faktor probabilitas *mutation* dan *crossover*. Faktor-faktor tersebut menyebabkan ruang pencarian solusi optimasi GA lebih besar untuk menghasilkan solusi optimal global (Zhang dkk., 2013). Adapun kelemahan yang dimiliki pada metode GA yaitu proses optimasi membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai kondisi konvergen. Selain itu, jika pada pemilihan nilai dan fungsi *crossover* tidak tepat, maka nilai optimal global tidak tercapai secara cepat dan tepat (Ahmad dkk., 2010).

Jaringan syaraf tiruan yang menerapkan algoritma BPNN dapat diimplementasikan dengan menggunakan perangkat lunak tertentu. Perangkat lunak tersebut mampu menurunkan angka iterasi pada performansi algoritma peramalan BPNN. Adapun langkah-langkah penggunaan perangkat lunak adalah sebagai berikut (Basuki, 2003):

1. Inisialisasi jaringan

Langkah pertama yang dilakukan untuk memprogram BPNN dengan perangkat lunak adalah dengan membuat inisialisasi jaringan. Untuk jaringan yang terdiri dari 5 data parameter input, 2 buah *hidden layer* (lapisan tersembunyi) yang terdiri dari masing-masing 8 unit, dan 3 data respon target, pola jaringan seperti ini dapat disingkat sebagai pola 5-8-8-3. Data input masukan pada proses peramalan BPNN menggunakan data berbentuk matrik. Bila data eksperimen dengan jumlah n data dan terdiri dari 5 input data dan 3 target data, maka matriks yang digunakan berupa matriks $[5 \times n]$ pada input data dan matriks $[3 \times n]$ pada target data. Jika bentuk matriks yang digunakan susunan baris dan kolom matriksnya terbalik, maka data matriks tersebut diperbaiki dengan menggunakan fungsi matriks *transpose*.

2. Kriteria pemberhentian peramalan BPNN

Ada beberapa kriteria pemberhentian peramalan BPNN yang dapat di atur sebelum dilakukan pelatihan. Dengan memberi nilai yang sudah ditentukan untuk



dimasukkan pada kriteria tersebut maka dapat diperoleh hasil yang optimal. Kriteria pemberhentian yang digunakan adalah sebagai berikut (Siang, 2005):

a. *net.trainParam.lr*

Parameter ini digunakan untuk menentukan laju pembelajaran *learning rate*. Adapun nilai *default learning rate* adalah sebesar 0,01. Bila nilai *rate* tersebut semakin besar dari pada nilai *default learning rate*, maka akan mengakibatkan proses pelatihan semakin cepat. Akan tetapi jika nilai *seting rate* yang dipilih terlalu besar, maka hasil optimasi BPNN menjadi tidak stabil dan diperoleh nilai optimum lokal.

b. *net.trainParam.lr_inc*

Parameter ini digunakan untuk men-setting nilai laju pembelajaran *learning rate* sehingga diperoleh laju pembelajaran yang terbaik.

c. *net.trainParam.mc*

Parameter ini digunakan untuk perubahan momentum bertujuan untuk menghindari perubahan bobot yang terlalu besar akibat perbedaan data target eksperimen dengan hasil optimasi BPNN.

d. *net.trainParam.goal*

Parameter ini digunakan untuk menentukan nilai *goal* yang bertujuan untuk menetapkan batas nilai MSE hasil optimasi BPNN. Iterasi akan berhenti jika MSE kurang dari batas nilai *goal* yang ditentukan dalam parameter ini.

e. *net.trainParam.epochs*

Parameter ini digunakan untuk menentukan jumlah maksimum *epoch* pelatihan BPNN. Iterasi akan berhenti jika jumlah *epoch* pelatihan lebih besar dari batas maksimum *epoch* yang ditentukan.

3. Penentuan fungsi peramalan BPNN

Metode modifikasi pada algoritma BPNN bertujuan untuk mempercepat fungsi pelatihan yang relatif lambat. Metode yang digunakan harus disesuaikan dengan kebutuhan dalam melatih suatu jaringan. Metode yang sering digunakan sebagai fungsi pelatihan adalah metode penurunan gradien dengan momentum (*traingda*, *traingdx*). Performansi dari algoritma ini sangat sensitif



terhadap besarnya nilai *learning rate*. Jika diberikan nilai *learning rate* yang besar maka hasil dari algoritma akan beresilasi dan menjadi tidak stabil dalam pelatihan. Sebaliknya, jika nilai *learning rate* terlalu besar maka proses iterasi membutuhkan waktu yang cukup lama dan akan tercapai optimum lokal (Siang, 2005).

4. Pembagian data peramalan BPNN

Pembagian data peramalan BPNN didasarkan pada tiga kelompok data, yaitu data untuk proses *training*, data untuk proses *validating*, dan data untuk proses *testing*. Ada dua cara untuk melakukan pembagian data tersebut, yaitu pembagian metode persentase dan pembagian menurut jumlah data yang ada. Bila pembagian data menggunakan metode persentase maka jumlah data pelatihan berdasarkan persentase pembagian tersebut dan pemilihan data pembagian dipilih secara random. Misalkan dimiliki sebanyak 100 data sampel dan persentase pembagian 70:15:15, maka data yang diolah secara random untuk data *training* adalah sebanyak 70 data sampel, data validasi adalah sebanyak 15 data sampel, dan data *testing* adalah sebanyak 15 data sampel. Metode pembagian menurut jumlah data diperlukan dengan komposisi 70:15:15. Misalkan dimiliki sebanyak 100 data sampel dengan pembagian data ke-1 sampai dengan data ke-70 digunakan sebagai data *training*, data ke-71 sampai ke-85 untuk data validasi, dan data ke-86 sampai ke-100 untuk data *testing* (Susanti, 2013).

5. Preprocessing data eksperimen

Preprocessing digunakan untuk melakukan normalisasi data eksperimen yang memiliki satuan dan interval yang berbeda-beda menjadi data yang non-dimensional dengan interval diantara $[-1, 1]$. Rumus untuk melakukan *preprocessing* data eksperimen adalah sebagai berikut (Yin, 2011):

$$p_n = \frac{2(p - \min(p))}{\max(p) - \min(p)} - 1 \quad (2.4)$$

Dengan:

p = data parameter-parameter input dan respon dari eksperimen

p_n = data hasil normalisasi parameter-parameter input dan respon eksperimen



6. Penentuan bobot dan bias awal

Pemilihan bobot dan bias awal akan mempengaruhi kecepatan kondisi konvergensi. Pemilihan bobot dan bias awal dapat diberikan dengan nilai tertentu atau nilai secara random. Bila nilai bobot awal terlalu besar maka perhitungan nilai turunan fungsi aktivasi yang digunakan menjadi sangat kecil dan membutuhkan waktu yang lama. Oleh sebab itu, pemilihan bobot pada metode BPNN ditentukan dengan menggunakan metode random dengan bilangan acak kecil. Penambahan jumlah *epoch* pelatihan akan mempengaruhi nilai bobot dan bias, sehingga nilai bobot dan bias akan terus mengalami perubahan setiap kali pelatihan jaringan BPNN (Siang, 2005).

7. Fungsi Aktivasi

Fungsi aktivasi yang dipakai pada *back propagation* harus memenuhi beberapa syarat, yaitu kontinyu, terdiferensial dengan mudah, dan merupakan fungsi yang tidak turun. Salah satu fungsi yang memenuhi ketiga syarat tersebut dan sering dipakai adalah fungsi *sigmoid biner* yang memiliki interval [0, 1]. Persamaan fungsi tersebut adalah sebagai berikut (Matlab, 2015):

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2.5)$$

dengan turunan

$$f'(x) = f(x)(1 - f(x)) \quad (2.6)$$

Selain fungsi *sigmoid biner*, juga sering digunakan fungsi *sigmoid bipolar* yang bentuk fungsinya mirip dengan fungsi *sigmoid biner*. Namun fungsi *sigmoid bipolar* memiliki interval [-1, 1]. Persamaan fungsi tersebut adalah sebagai berikut (Matlab, 2015):

$$f(x) = \frac{2}{1+e^{-x}} - 1 \quad (2.7)$$

dengan turunan

$$f'(x) = \frac{(1+f(x))(1-f(x))}{2} \quad (2.8)$$

Nilai maksimum yang dimiliki fungsi sigmoid adalah satu. Untuk pola yang targetnya lebih besar dari satu *input* dan *output* harus terlebih dahulu



ditransformasi, sehingga polanya memiliki interval yang sama seperti fungsi *sigmoid* yang digunakan.

Fungsi aktivasi *sigmoid* pada *output layer* menggunakan fungsi identitas. Persamaan fungsi tersebut adalah sebagai berikut (Matlab, 2015):

$$f(x) = x \quad (2.9)$$

8. Pelatihan model BPNN

Pelatihan BPNN meliputi 3 fase (Rabiha, 2013). Fase pertama adalah fase propagasi maju. *Input layer* dihitung maju mulai dari *input layer* hingga *output layer* menggunakan fungsi aktivasi yang ditentukan. Fase kedua adalah fase propagasi mundur. Selisih antara keluaran jaringan BPNN dengan target yang diinginkan merupakan nilai error yang terjadi. Nilai error tersebut dipropagasikan mundur, dimulai dari *layer* yang berhubungan langsung dengan *neuron-neuron* di *output layer*. Fase ketiga adalah perubahan bobot untuk menurunkan nilai error yang terjadi.

Fase 1: Propagasi maju

Selama propagasi maju, *input layer* (x_i) dipropagasikan ke *hidden layer* menggunakan fungsi aktivasi yang ditentukan. Nilai keluaran dari setiap *neuron* pada *hidden layer* (z_j) tersebut selanjutnya dipropagasikan maju lagi ke *hidden layer* di sebelumnya dengan menggunakan fungsi aktivasi yang ditentukan. Demikian seterusnya hingga menghasilkan *output layer* (y_k). Berikutnya, nilai *output layer* (y_k) dibandingkan dengan target yang harus dicapai (t_k). Selisih $t_k - y_k$ adalah nilai error yang terjadi. Jika nilai error ini lebih kecil dari batas toleransi yang ditentukan, maka iterasi dihentikan. Akan tetapi apabila kesalahan masih lebih besar dari batas toleransinya, maka bobot setiap *neuron* dalam jaringan akan dimodifikasikan untuk mengurangi kesalahan yang terjadi.

Fase 2: Propagasi mundur

Berdasarkan kesalahan $t_k - y_k$, dihitung faktor δ_k ($k=1, 2, \dots, m$) yang dipakai untuk mendistribusikan error di *neuron* y_k ke semua *hidden layer* yang terhubung langsung dengan y_k . nilai δ_k juga dipakai untuk mengubah bobot garis yang menghubungkan langsung dengan *output layer*. Dengan cara yang sama,



dihitung δ_j di setiap unit di *hidden layer* sebagai dasar perubahan bobot semua garis yang berasal dari *hidden layer* di lapis dibawahnya. Demikian seterusnya hingga faktor δ di *hidden layer* yang berhubungan langsung dengan *input layer* dihitung.

Fase 3: Perubahan bobot

Setelah semua faktor δ dihitung, bobot semua garis dimodifikasi bersamaan. Perubahan bobot suatu garis didasarkan atas faktor δ *neuron* di lapis atasnya. Sebagai contoh, perubahan bobot garis yang menuju ke *output layer* didasarkan atas dasar δ_k yang ada di *output layer*. Ketiga fase tersebut diulang-ulang terus hingga kondisi penghentian dipenuhi. Umumnya kondisi penghentian yang sering dipakai adalah jumlah iterasi atau nilai error. Iterasi akan dihentikan jika jumlah iterasi yang dilakukan sudah melebihi jumlah maksimum iterasi yang ditetapkan, atau jika error yang terjadi sudah lebih kecil dari batas toleransi yang diijinkan.

9. Perhitungan hasil peramalan dengan BPNN

Perhitungan nilai persen error dari selisih data eksperimen dengan hasil peramalan BPNN adalah sebagai berikut (Rong, 2015):

$$\text{error} = \frac{\text{Eksp.} - \text{BPNN}}{\text{Eksp.}} \times 100\% \quad (2.9)$$

Dengan:

Eksp. = nilai parameter respon dari eksperimen

BPNN = nilai hasil peramalan BPNN

Perhitungan nilai *mean square error* (MSE) dari data eksperimen dengan hasil peramalan dengan BPNN adalah sebagai berikut (Rong, 2015):

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.10)$$

Dengan:

x_i = hasil peramalan dengan BPNN

\bar{x} = nilai rata-rata hasil peramalan dengan BPNN



2.6 Metode Optimasi GA

GA merupakan algoritma pencarian heuristik yang didasarkan atas mekanisme seleksi dan genetika alami. Konsep dasar GA adalah teori evolusi yang dikemukakan oleh Charles Darwin. Algoritma genetika dimulai dengan membentuk sejumlah alternatif solusi yang disebut sebagai populasi. Setiap solusi pada algoritma genetika diwakili oleh satu individu atau satu kromosom.

Beberapa istilah yang perlu diketahui dalam melakukan optimasi dengan menggunakan metode GA (Fais, 2006) adalah:

1. *Genotype* (gen) adalah sebuah nilai yang menyatakan satuan dasar yang membentuk suatu arti tertentu dalam satu kesatuan gen yang dinamakan kromosom. Pada GA, gen ini bisa berupa nilai biner, *float*, integer maupun karakter.
2. Kromosom adalah gabungan gen-gen yang membentuk nilai tertentu.
3. Individu menyatakan satu nilai atau keadaan yang menyatakan salah satu solusi yang mungkin dari permasalahan yang diangkat.
4. Populasi merupakan sekumpulan individu yang akan diproses bersama dalam satu siklus proses evolusi.
5. Generasi menyatakan satu-satuan siklus proses evolusi.
6. Nilai *fitness* menyatakan seberapa baik nilai dari suatu individu atau solusi yang didapatkan.

GA termasuk metode *adaptive* yang biasa digunakan untuk memecahkan suatu pencarian nilai dalam suatu masalah optimasi. Proses optimasi dengan menggunakan metode GA harus memperhatikan setting fungsi optimasi yang terdapat didalam bahasa pemrograman GA agar diperoleh nilai optimal yang tepat (Basuki, 2003). Faktor-faktor yang perlu diperhatikan pada optimasi dengan menggunakan GA, antara lain adalah (Susanti, 2013):

1. Memahami permasalahan apa yang membutuhkan algoritma genetika
2. Strategi mendefinisikan individu
3. Strategi menentukan bentuk kromosom
4. Strategi menentukan *fitness*
5. Strategi menentukan seleksi



6. Strategi menentukan proses *crossover*

7. Strategi menentukan mutasi

GA sering digunakan untuk menyelesaikan permasalahan *searching* dan optimasi yang mempunyai kompleksitas tinggi, yang banyak terjadi dalam permasalahan *dynamic programming*. Optimasi dengan menggunakan metode GA dapat menghindari diperolehnya lokal optimum.

Adapun jenis permasalahan yang dapat diselesaikan dengan menggunakan metode GA antara lain adalah permasalahan-permasalahan yang (Faiz, 2006):

1. Mempunyai fungsi tujuan optimasi non linier.
2. Mempunyai kemungkinan solusi yang jumlahnya tak berhingga.
3. Membutuhkan solusi “*real-time*”, dalam arti solusi bisa didapatkan dengan cepat sehingga dapat diimplementasikan untuk permasalahan yang mempunyai perubahan yang cepat.
4. Mempunyai *multi-objective* dan *multi-criteria*, sehingga diperlukan solusi yang dapat secara bijak diterima oleh semua pihak.

GA menggunakan dan memanipulasi populasi untuk memperoleh kondisi optimum. Dalam setiap langkah, GA menyeleksi secara acak dari populasi yang ada untuk menentukan yang akan menjadi *parent* dan menggunakannya untuk menghasilkan *children* pada generasi berikutnya. Pada setiap generasi, kesesuaian *parent* atau individu dalam populasi dievaluasi. Beberapa individu dipilih dari populasi mereka berdasarkan kesesuaian mereka dalam fungsi *fitness* dan diubah (direkomendasikan dan mungkin bermutasi secara acak) untuk membentuk suatu populasi baru. Populasi baru itu kemudian digunakan untuk iterasi selanjutnya dalam GA. Peramalan GA akan berhenti ketika jumlah maksimum dari generasi telah dihasilkan atau tingkat kesesuaian yang telah ditentukan terpenuhi untuk populasi tersebut. Langkah-langkah untuk menciptakan generasi berikutnya dari populasi dalam penyelesaian permasalahan dengan menggunakan metode GA adalah sebagai berikut (Susanti, 2013):



a. Proses seleksi

Proses seleksi merupakan proses memilih individu, yang disebut sebagai *parent* (induk), yang akan menghasilkan populasi baru di generasi berikutnya.

Proses seleksi akan menentukan individu-individu mana saja yang akan dipilih untuk dilakukan rekombinasi dan bagaimana individu baru (*offspring*) terbentuk dari individu-individu terpilih tersebut. Seleksi dilakukan untuk mendapatkan calon induk yang baik, sehingga dengan induk yang baik, diharapkan akan menghasilkan keturunan yang baik. Metode seleksi dalam pemilihan individu dapat dilakukan dengan cara-cara sebagai berikut (Matlab, 2015):

1. *Roulette Wheel Selection* (RWS)

RWS merupakan metode penyeleksian individu secara probabilistik berdasarkan performansi tiap individu. Seleksi RWS dilakukan seperti pembuatan piringan *roulette* yang memiliki slot-slot.

2. *Stochastic Universal Sampling* (SUS)

Metode SUS hampir sama dengan metode RWS, dimana SUS menggunakan N buah *pointer* dengan spasi yang sama pada segmen garis tempat probabilitas individu diseleksi dipetakan. N adalah jumlah individu terseleksi yang diharapkan.

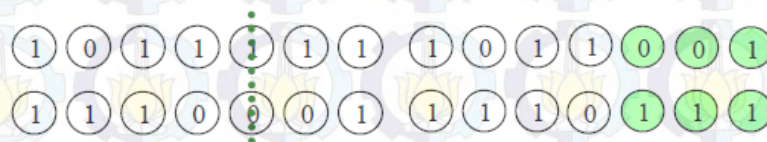
b. Proses pindah silang (*crossover*)

Crossover merupakan pelatihan dalam GA yang melibatkan dua induk untuk menghasilkan keturunan yang baru. Proses *crossover* dilakukan dengan melakukan pertukaran gen dari dua induk secara acak, pada setiap individu dengan probabilitas *crossover* yang ditentukan. Metode *crossover* yang sering digunakan adalah metode pertukaran secara langsung, dimana metode ini dapat dilakukan dengan 2 cara, yaitu dengan satu titik dan lebih dari satu titik (dua titik atau lebih dari dua titik), seperti yang diuraikan berikut ini (Matlab, 2015):

1. *Crossover* satu titik



Crossover satu titik biasanya digunakan untuk representasi kromosom dalam biner. Pada *crossover* satu titik, dimana posisi *crossover* ($k=1,2,3,\dots, N-1$) dan N merupakan panjang kromosom yang diseleksi secara random. Keturunan baru (*offspring*) dihasilkan dari perpindahan variabel-variabel antar kromosom pada satu titik tertentu. Gambar 2.16 menunjukkan proses *crossover* satu titik.



Gambar 2.16 Proses *crossover* satu titik

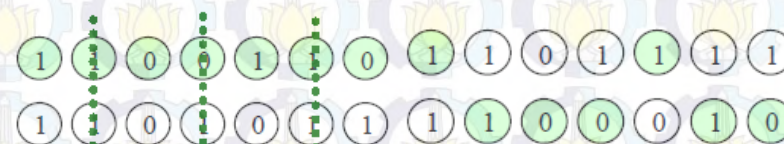
2. *Crossover* lebih dari satu titik

Metode *crossover* dengan lebih dari satu titik dapat dilakukan dengan minimum dua titik. Posisi *crossover* diseleksi secara random dan tidak boleh ada posisi yang sama. Selain itu posisi *crossover* juga harus diurutkan naik. Pertukaran variabel-variabel pada titik tersebut akan menghasilkan keturunan baru (*offspring*). Gambar

2.17 mengilustrasikan proses *crossover* dengan dua titik dan Gambar 2.18 mengilustrasikan proses *crossover* dengan banyak titik.



Gambar 2.17 Proses *crossover* dua titik



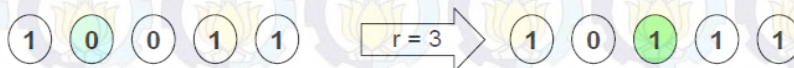
Gambar 2.18 Proses *crossover* banyak titik

c. Proses mutasi

Mutasi merupakan bentuk genetika yang berperan menggantikan satu gen yang hilang akibat proses seleksi dalam kromosom dari bentuk aslinya dan akan menghasilkan sebuah gen baru (Susanti, 2013). Mutasi gen



merupakan operator yang menukarnilai dengan nilai inversnya (misalnya gen yang bernilai 0 menjadi 1). Setiap individu mengalami mutasi dengan probabilitas mutasi yang ditentukan. Proses mutasi dilakukan dengan memberikan nilai inversi atau menggesernilai gen pada gen yang terpilih untuk dimutasikan. Kromosom anak dimutasi dengan menambahkan nilai random yang sangat kecil (ukuran langkah mutasi), dengan probabilitas yang rendah. Peluang mutasi (P_m) didefinisikan sebagai persentase dari jumlah total gen pada populasi yang mengalami mutasi. Peluang mutasi dapat mengendalikan banyaknya gen baru yang akan dimunculkan untuk dievaluasi. Jika peluang mutasi terlalu kecil, banyak gen yang mungkin berguna tidak pernah dievaluasi. Namun bila peluang mutasi terlalu besar, maka akan banyak gangguan acak, sehingga *children* akan kehilangan kemiripan dengan induknya, serta algoritma juga akan kehilangan kemampuan untuk belajar dari historipencariannya. Ada beberapa pendapat dalam menentukan laju mutasi, yaitu salah satunya dengan berdasarkan jumlah populasinya ($1/n$). Namun ada juga yang berpendapat bahwa laju mutasi tidak tergantung dari jumlah populasinya. Gambar 2.19 mengilustrasikan proses dan hasil mutasi gen.



Gambar 2.19 Proses dan hasil mutasi

Proses optimasi GA dapat dilakukan dengan tahapan sebagai berikut (Faiz, 2006; Matlab, 2015):

1. Inisialisasi populasi

Memasukkan indeks generasi (*Gene*), jumlah populasi (N_{pop}), dan jumlah variabel bebas ($nvars$). Populasi dihasilkan secara acak. Setiap individu dengan jarak tertentu atau disebut dengan *genes* dibagi menjadi beberapa *segment* berdasar jumlah variabel yang dimaksud ($nvars$).

Individu adalah suatu komposisi nilai yang menyatakan solusi dari suatu permasalahan. Permasalahan optimasi adalah suatu permasalahan yang mempunyai banyak solusi dan harus bisa ditentukan solusi mana



yang dikatakan optimal. Berdasarkan definisi individu algoritma genetika dibedakan menjadi 2 macam yaitu *static genetic algorithm* (ukuran individu sama untuk satu populasi) dan *dynamic genetic algorithm* (ukuran individu tidak sama untuk satu populasi).

Nilai fungsi $F(x,y,z)$ sangat tergantung pada nilai (x,y,z) . Artinya solusi yang dicari adalah nilai (x,y,z) yang menyebabkan nilai $F(x,y,z)$ maksimum. Individu didefinisikan sebagai nilai (x,y,z) dan dituliskan dengan:

$$S = \{(x, y, z) | x, y, z \in R\} \quad (2.11)$$

2. Perhitungan *fitness*

Dalam langkah ini, *performance(fitness)* dari populasi dihasilkan berdasar fungsi *fitness*. Vektor input akan dilatih oleh pemodelan BPNN agar mendapatkan hubungan antar input-output. Output ditransformasikan kembali ke nilai awal dan kemudian dimanfaatkan untuk perhitungan nilai *fitness* pada data.

Nilai *fitness* merupakan suatu ukuran baik tidaknya suatu solusi yang dinyatakan sebagai satu individu, atau dengan kata lain nilai *fitness* menyatakan nilai dari fungsi tujuan. Algoritma genetika mempunyai tujuan untuk memaksimalkan nilai *fitness* atau mencari nilai *fitness* maksimal. Untuk permasalahan minimalisasi, nilai *fitness* adalah invers dari nilai minimal yang diharapkan. Proses inversi dapat dilakukan dengan:

$$Fitness = A - F(x) \text{ atau } Fitness = \frac{A}{F(x) + \epsilon} \quad (2.12)$$

Dengan:

A = konstanta yang ditentukan

x = individu (kromosom)

ϵ = bilangan kecil yang ditentukan untuk menghindari pembagi nol atau $F(x)=0$



3. Skala dari skor *fitness*

Dalam GA, seleksi menggunakan nilai skala *fitness* untuk memilih *parent* pada generasi selanjutnya. Selisih antar skala akan mempengaruhi *performance* dari GA. Jika skalanya terlalu luas, maka individu dengan nilai skala tertinggi akan bereproduksi dengan cepat. Selain itu, pengambil-alihan populasi juga terlalu cepat, sehingga mencegah GA mencari daerah lain pada penyelesaiannya. Dan bila nilai skalanya terlalu kecil, semua individu rata-rata akan mengalami kemajuan yang terlalu lambat. Dalam algoritma, skor terendah mempunyai nilai skala yang tertinggi.

4. Seleksi *parent*

Pemilihan *parent* berdasar pada nilai skala. Individu dapat dipilih lebih dari sekali sebagai *parent*. Kemungkinan pemilihan tertinggi adalah pada individu dengan skala tertinggi.

5. Reproduksi *children*

Pemilihan reproduksi akan mempengaruhi pembuatan *children* pada GA dalam generasi berikutnya berdasarkan *parent* yang telah dipilih. *Elite count* (*Ecount*) menunjukkan jumlah individu dengan nilai *fitness* terbaik, sehingga dapat bertahan pada generasi berikutnya. *Ecount* diatur dengan range: $1 \leq E_{count} \leq N_{pop}$. Individu ini dinamakan *elite children*. *Crossover fraction* (P_{cross}) merupakan fraksi pada setiap populasi, yang dihasilkan melalui *crossover*. Sisa individu pada generasi berikutnya dihasilkan oleh proses mutasi.

6. Perpindahan tempat *children* pada populasi (mutasi)

Setelah *children* yang baru didapatkan, maka populasi dipindahkan tempat dengan *children*, sehingga membentuk generasi selanjutnya.

7. *Increment* indeks generasi

8. Mengulangi langkah 4-7 hingga didapatkan hasil yang konvergen.

9. Mendapatkan *children* yang tertinggi sebagai nilai optimal.



Kriteria untuk penghentian algoritma adalah (Matlab, 2015):

- a. Generasi: algoritma akan berhenti ketika generasi telah mencapai nilai maksimum (*Genmax*).
- b. Batas *fitness*: algoritma akan berhenti ketika fungsi *fitness* pada populasi mempunyai *point* yang terbaik mendekati atau sama dengan batas *fitness*.
- c. Batas waktu: algoritma akan berhenti ketika batas waktu telah tercapai.
- d. Penghentian generasi: algoritma akan berhenti, ketika tidak terjadi peningkatan pada fungsi obyektif secara berurutan.
- e. Penghentian batas waktu: algoritma akan berhenti ketika tidak terjadi peningkatan fungsi selama interval waktu.



[halaman ini sengaja dikosongkan]



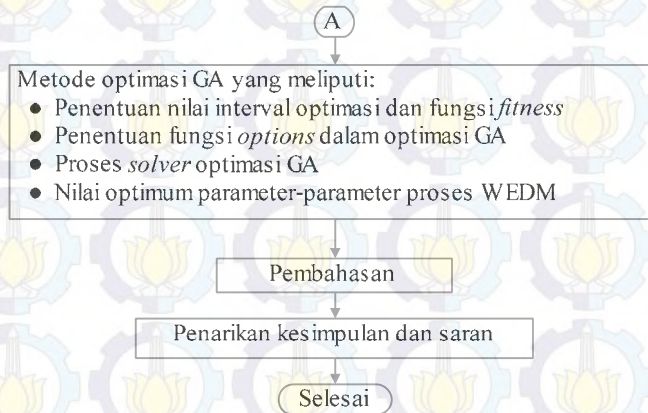
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Langkah-langkah penelitian yang dilakukan pada penelitian ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1. Diagram alir metodologi penelitian



Gambar 3.2. Diagram alir metodologi penelitian (lanjutan)

3.2 Parameter Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh dari hasil eksperimen. Parameter-parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.2.1 Parameterkontrol

Parameterkontrol merupakan parameter yang dapat dikendalikan dan nilainya dapat ditentukan berdasarkan tujuan dari penelitian yang dilakukan. Parameter kontrol yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- Arc on time* (AN)
- On time* (ON)
- Open voltage* (OV)
- Off time* (OFF)
- Servo voltage* (SV)

3.2.2 Parameterrespon

Parameterrespon merupakan respon yang akan diamati dalam penelitian. Parameterrespon yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- Tebal lapisan *recast*
- Kekasaran permukaan
- Microcrack*



3.2.3 Parameterkonstan

Parameterkonstan merupakan parameter yang tidak diteliti dalam penelitian. Nilai parameter ini dijaga selalu konstan agar tidak berubah selama percobaan, sehingga tidak mempengaruhi hasil penelitian secara signifikan. Parameter-parameter proses WEDM yang menjadi parameterkonstan pada penelitian ini adalah:

- a. *Low power* (LP)
- b. *Arc off time* (AFF)
- c. *Feedrate override* (FR)
- d. *Wire feed* (WF)
- e. *Wire tension* (WT)
- f. *Water flow* (WL)
- g. *Feedrate* (F)

3.2.4 Parameternoise

Parameternoise adalah parameter gangguan yang memiliki pengaruh terhadap respon, tetapi sangat sulit untuk dikendalikan. Parameter-parameter yang mungkin menjadi *noise* dalam penelitian ini adalah temperatur cairan dielektrik, konsentrasi geram dalam cairan dielektrik, ukuran partikel serbuk aluminium dan kondisi permukaan kawat elektroda. Parameter-parameter ini tidak dimasukkan ke dalam rancangan percobaan, sehingga pengambilan data dilakukan dengan replikasi untuk mengatasi pengaruh parameternoise pada hasil penelitian.

3.3 Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan dan peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.3.1 Bahan penelitian

Material benda kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja perkakas SKD61 dan kawat elektroda yang digunakan adalah kuningan. Informasi lengkap mengenai bahan penelitian tersebut adalah sebagai berikut:

1. Benda Kerja

Material yang digunakan adalah baja perkakas SKD61 yang memiliki kekerasan sebesar 44HRC dengan dimensi 15 x 30 x 200 mm.



2. Kawat Elektroda

Kawat elektroda yang digunakan adalah kawat Seiki Denko HSD-25P-5RT berbahan kuningan dengan diameter 0,25 mm.

3.3.2 Peralatan penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah mesin WEDM, peralatan ukur dan peralatan bantu. Peralatan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Mesin WEDM

Mesin WEDM yang digunakan pada penelitian ini adalah CHMER32GF, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Secara detil, spesifikasi mesin WEDMCHMER32GF dapat dilihat pada Lampiran A.



Gambar 3.3. Mesin WEDM CHMER32GF

2. Peralatan Ukur

a. *Surface Roughness Tester*

Pengukuran kekasaran permukaan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Mitutoyo *Surftest*301 seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.4. Alat ini memiliki kecermatan sebesar 0,1 μm .



Gambar 3.4. Mitutoyo *surftest*301



b. SEM (*Scanning Electron Microscope*)

Pengukuran tebal lapisan *recast* dan *microcrack* pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan SEM EVO MA10 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5. Alat ini digunakan untuk mengamati sebarang yang dapat diperbesar sampai 150.000 kali dan resolusi pengamatan 100 nanometer.



Gambar 3.5. SEM EVO MA10

c. Peralatan Bantu

Peralatan bantu yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- Gerinda dan kertas gosok

Alat ini digunakan untuk meratakan dan menghaluskan permukaan spesimen uji serta membersihkan benda kerja dari kotoran yang bersifat isolator.

- Mistar insut

Alat ini digunakan untuk mengukur dimensi benda kerja. Alat ini mempunyai kecermatan 0,05 mm.

- Meja rata

Meja rata digunakan untuk meletakkan spesimen uji pada saat pengukuran kekasaran permukaan.



3.4 Rancangan Percobaan

3.4.1 Seting paramater pada mesin WEDM

Penentuan seting paramater pada mesin WEDM dilakukan dengan mengacupada rekomendasi *Wire Cut Cutting Data Manual*. Nilai seting paramater untuk kawat elektroda berdiameter 0,25 mm dan material benda kerja baja SKD 61 dengan ketebalan 30 mm ditunjukkan oleh Tabel 3.1. Metode *flushing* yang digunakan pada eksperimen ini adalah *open contact machining* dengan jarak antara *upper nozzle* dan *lower nozzle* sebesar 10 mm.

Tabel 3.1 Seting mesin untuk parameter konstan

| | | | |
|---|-------------------|-------|----|
| 1 | Low power | | 10 |
| 2 | Arc off time | A | 9 |
| 3 | Feedrate override | mm/s | 9 |
| 4 | Wire tension | gr | 9 |
| 5 | Feedrate mode | | 0 |
| 6 | Feedrate | mm/s | 1 |
| 7 | Wire feed | mm/s | 11 |
| 8 | Water flow | kg/cm | 6 |

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, pengalaman operator dan *Wire Cut Cutting Data Manual*, maka seting level-level dari parameter kontrol yang digunakan pada eksperimen ini ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Seting parameter dan level yang digunakan dalam percobaan

| | | | | | |
|---|---------------|---------|-----|-----|-----|
| A | Arc on time | μ s | 2 | 3 | - |
| B | On time | μ s | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| C | Open voltage | Volt | 90 | 100 | 110 |
| D | Off time | μ s | 8 | 9 | 10 |
| E | Servo voltage | Volt | 32 | 36 | 40 |

3.4.2 Pemilihan Matriks Ortogonal

Matriks ortogonal yang akan digunakan harus memiliki derajat kebebasan yang sama atau lebih besar daripada total derajat kebebasan parameter dan level yang telah ditetapkan. Derajat kebebasan parameter dan level tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan 2.6 dan disajikan pada Tabel 3.3.



Tabel 3.3 Total derajat kebebasan paramater dan level

| | | | |
|--------------------------------|-------------------------|---|---|
| | | | |
| 1 | <i>Arc on time (A)</i> | 2 | 1 |
| 2 | <i>On time (B)</i> | 3 | 2 |
| 3 | <i>Open voltage(C)</i> | 3 | 2 |
| 4 | <i>Off time(D)</i> | 3 | 2 |
| 5 | <i>Servo voltage(E)</i> | 3 | 2 |
| Total derajat kebebasan | | | 9 |

Tabel 3.3 menunjukkan bahwa total derajat kebebasan paramater dan level yang digunakan adalah 9. Hal ini mengakibatkan derajat kebebasan minimum yang harus dimiliki oleh matriks ortogonal yang akan digunakan adalah 9. Oleh karena itu, sesuai dengan pilihan yang tersedia, matriks ortogonal L_{18} ($2^1 \times 3^4$) memenuhi syarat untuk dijadikan sebagai rancangan percobaan. Rancangan percobaan matriks ortogonal L_{18} ditunjukkan oleh Tabel 3.4 sebagai berikut:

Tabel 3.4 Rancangan percobaan taguchi

| | A | B | C | D | E |
|----|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 |
| 7 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 |
| 8 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 12 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 17 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 18 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 |

Eksperimen dilakukan secara acak dengan mengacu pada rancangan percobaan ditunjukkan pada Tabel 3.4. Pengacakan ini dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat komputasi statistik. Masing-masing eksperimen akan dilakukan dengan replikasi sebanyak dua kali untuk mengatasi paramater gangguan (*noise*) yang terjadi selama proses pemotongan berlangsung.



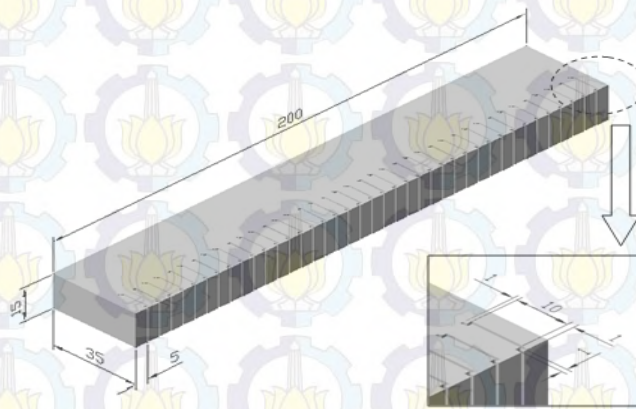
Tampilan pelaksanaan eksperimen tersebut ditunjukkan oleh Tabel 3.5 sebagai berikut:

Tabel 3.5 Tampilan data hasil eksperimen

| | μm | μm | $\mu\text{m}/\text{mm}^2$ |
|-----------|---------------|---------------|---------------------------|
| 1 | Y_{111} | Y_{121} | Y_{131} |
| | Y_{112} | Y_{122} | Y_{132} |
| 2 | Y_{211} | Y_{221} | Y_{231} |
| | Y_{212} | Y_{222} | Y_{232} |
| - | - | - | - |
| | - | - | - |
| 18 | Y_{1811} | Y_{1821} | Y_{1831} |
| | Y_{1812} | Y_{1822} | Y_{1832} |

Keterangan: Y_{ijk} adalah data untuk kombinasi seting parameter ke-i, respon ke-j, dan replikasi ke-k. Nilai: $i = 1, \dots, 18$; $j = 1, \dots, 3$; $k = 1, \dots, 2$

Gambar 3.5 menunjukkan urutan proses pemotongan yang pertama hingga pemotongan yang terakhir. Pemotongan material dilakukan sepanjang 10 mm dengan jarak antar pemotongan sebesar 5 mm. Setelah semua proses pemotongan selesai dilakukan, material dipotong dengan arah tegak lurus pemotongan awal pada jarak 5 mm dari ujung pemotongan awal.



Gambar 3.5 Skema proses pemotongan WEDM



3.5 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah percobaan yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen yang meliputi: penyesuaian ukuran, perataan dan penghalusan permukaan, serta pembersihan spesimen dari kotoran-kotoran yang dapat mengganggu proses pemotongan.
2. Memasang spesimen pada jig yang tersedia pada mesin dan menjepit bagian spesimen yang tidak mengalami proses pemotongan, kemudian menentukan sumbu referensi pemesinan pada spesimen.
3. Memeriksa kawat elektroda berdiameter 0,25 mm pada jalur roll-roll yang tersedia pada mesin.
4. Menghidupkan mesin WEDM dan menseting parameter-parameter yang telah ditetapkan sesuai dengan rancangan eksperimen.
5. Melaksanakan proses pemotongan berdasarkan seting parameter yang telah ditentukan.
6. Mengeluarkan dan mengeringkan benda kerja setelah proses pemotongan selesai.
7. Mengamati dan mengambil gambar lapisan *recast* dan *microcracks* yang terbentuk pada permukaan benda kerja kemudian mengukur tebal lapisan *recast* dan *microcracks* pada foto SEM dengan menggunakan perangkat lunak AutoCAD.
8. Mengukur kekasaran permukaan dengan menggunakan alat ukur *surface roughness tester*.

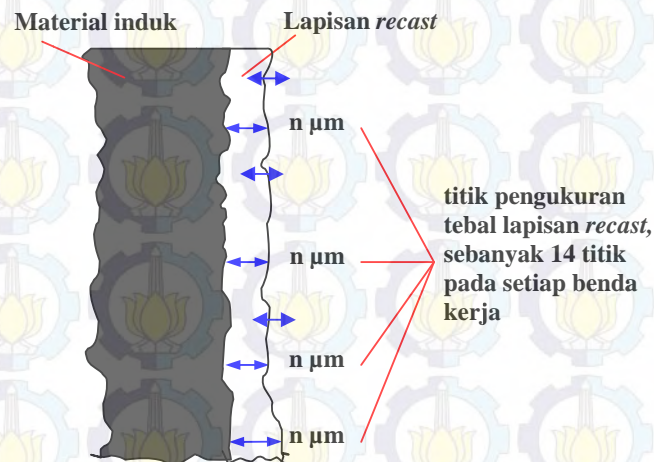
3.6 Pengukuran dan Pengambilan Data

3.6.1 Pengambilan data tebal lapisan *recast* dan *microcracks*

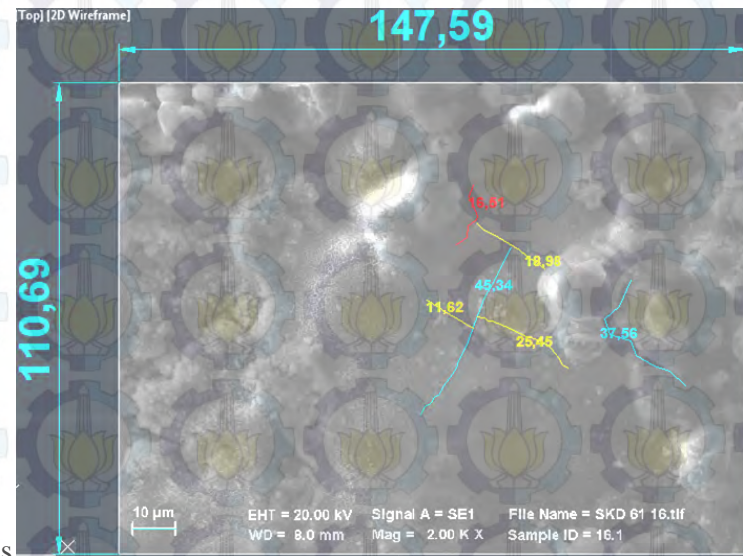
Sebelum tebal lapisan *recast* dan *microcracks* diukur, benda kerja diamati terlebih dahulu dengan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). Setelah lapisan tersebut terlihat pada monitor, kemudian gambar tersebut diambil sebanyak dua kali pada masing-masing spesimen dan disimpan. Pengukuran tebal lapisan *recast* dilakukan pada setiap foto dengan menggunakan perangkat lunak AutoCAD, dengan cara menarik garis ukur antara kedua tepi lapisan seperti yang



ditunjukkan pada Gambar 3.6. Ada 14 titik pengukuran untuk masing-masing spesimen pada permukaan benda kerja. Hasil pengukuran lalu dihitung nilai rata-ratanya, sehingga diperoleh tebal lapisan *recast* untuk masing-masing spesimen, sedangkan kuantifikasi suatu retakan (*microcracks*) pada permukaan benda kerja dilakukan dengan cara menghitung rasio kepadatan retakan permukaan dengan menggunakan persamaan 2.1 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.6. Skema pengukuran tebal lapisan *recast*



Gambar 3.7. Skema pengukuran *microcrack*



3.6.2 Pengambilan data kekasaran permukaan

Angka kekasaran permukaan yang diamati adalah kekasaran aritmatika (R_a) yang dinyatakan dalam μm . Tabel 2.1 merekomendasikan panjang sampel pengukuran yang digunakan adalah 0,8 mm. Permukaan benda kerja yang merupakan hasil pemotongan diukur kekasaran permukaannya dengan arah tegak lurus terhadap arah pemotongan benda kerja seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Skema arah proses pemotongan dan pengukuran kekasaran permukaan benda kerja



3.7 Pengolahan Data

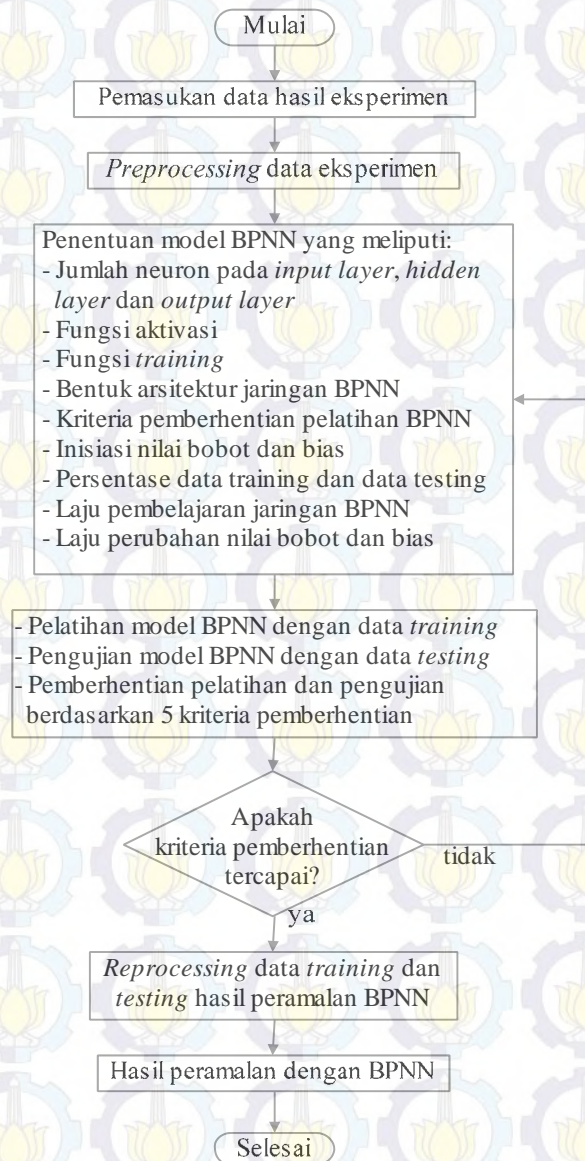
3.7.1. Metode peramalan *back-propagation neural network*

Langkah-langkah metode BPNN yang dilakukan pada penelitian ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 3.9. Diagram alir metode peramalan BPNN dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pemasukan data hasil eksperimen WEDM.
2. *Preprocessing* untuk data input BPNN. *Preprocessing* digunakan untuk melakukan normalisasi data eksperimen yang memiliki satuan dan interval yang berbeda-beda menjadi data yang non-dimensional dengan interval diantara [-1, 1].
3. Penentuan model peramalan BPNN yang meliputi:
 - (a) Penentuan jumlah *neuron* pada *input layer*, *hidden layer* dan *output layer*, fungsi aktivasi yang digunakan pada *hidden layer* dan fungsi *training* yang digunakan untuk menyelesaikan model peramalan BPNN.
 - (b) Penentuan kriteria pemberhentian (*stopping criteria*) peramalan BPNN. Kriteria pemberhentian tersebut terdiri dari jumlah *epoch* maksimum, waktu iterasi maksimum, nilai performa maksimum, nilai gradien maksimum, dan jumlah *epoch* validasi maksimum.
 - (c) Penentuan nilai *inisialisasi* bobot dan bias.
 - (d) Penentuan persentase data *training* dan data *testing* yang dipilih secara random.
 - (e) Penentuan laju pembelajaran peramalan BPNN.
 - (f) Penentuan laju perubahan nilai bobot dan bias selama peramalan BPNN berlangsung.
4. Pelatihan model peramalan BPNN yang telah dibuat dengan menggunakan data *training*.
5. Pengujian model BPNN dengan menggunakan data *testing*.
6. Perhitungan terhadap kondisi pemberhentian pelatihan dan pengujian berdasarkan lima kriteria pemberhentian.
7. Pemeriksaan terhadap kriteria pemberhentian mana yang telah tercapai. Bila salah satu kriteria pemberhentian tersebut belum tercapai, maka pelatihan dan pengujian dilakukan kembali dengan mengulangi langkah ke-4.



8. *Reprocessing* data *training* dan data *testing* hasil peramalan BPNN dilakukan untuk memperoleh nilai hasil peramalan yang sebenarnya, bukan nilai-nilai dalam interval $[-1, 1]$.
9. Penyimpanan model BPNN.



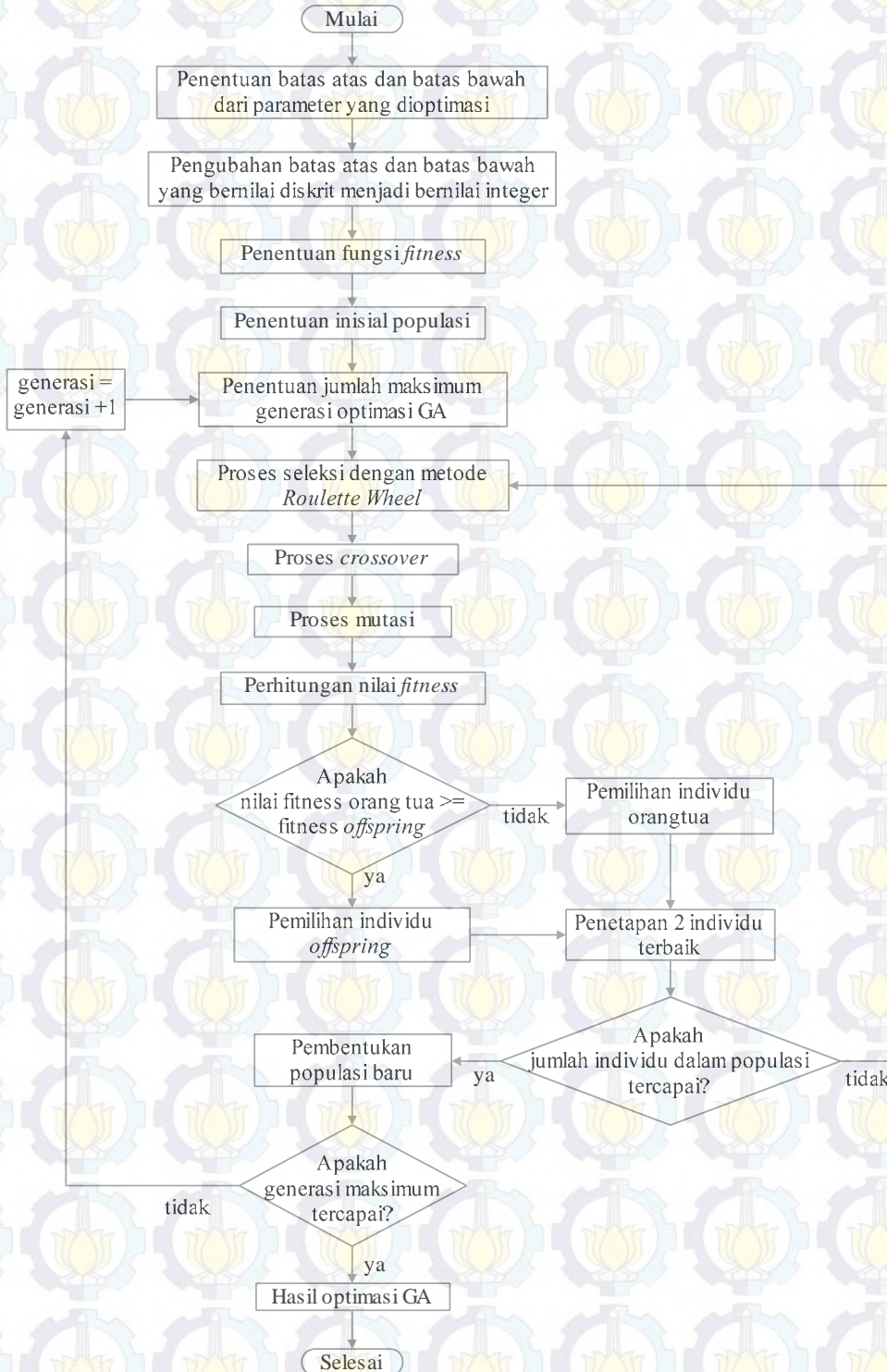
Gambar 3.9. Diagram alir metode peramalan dengan BPNN



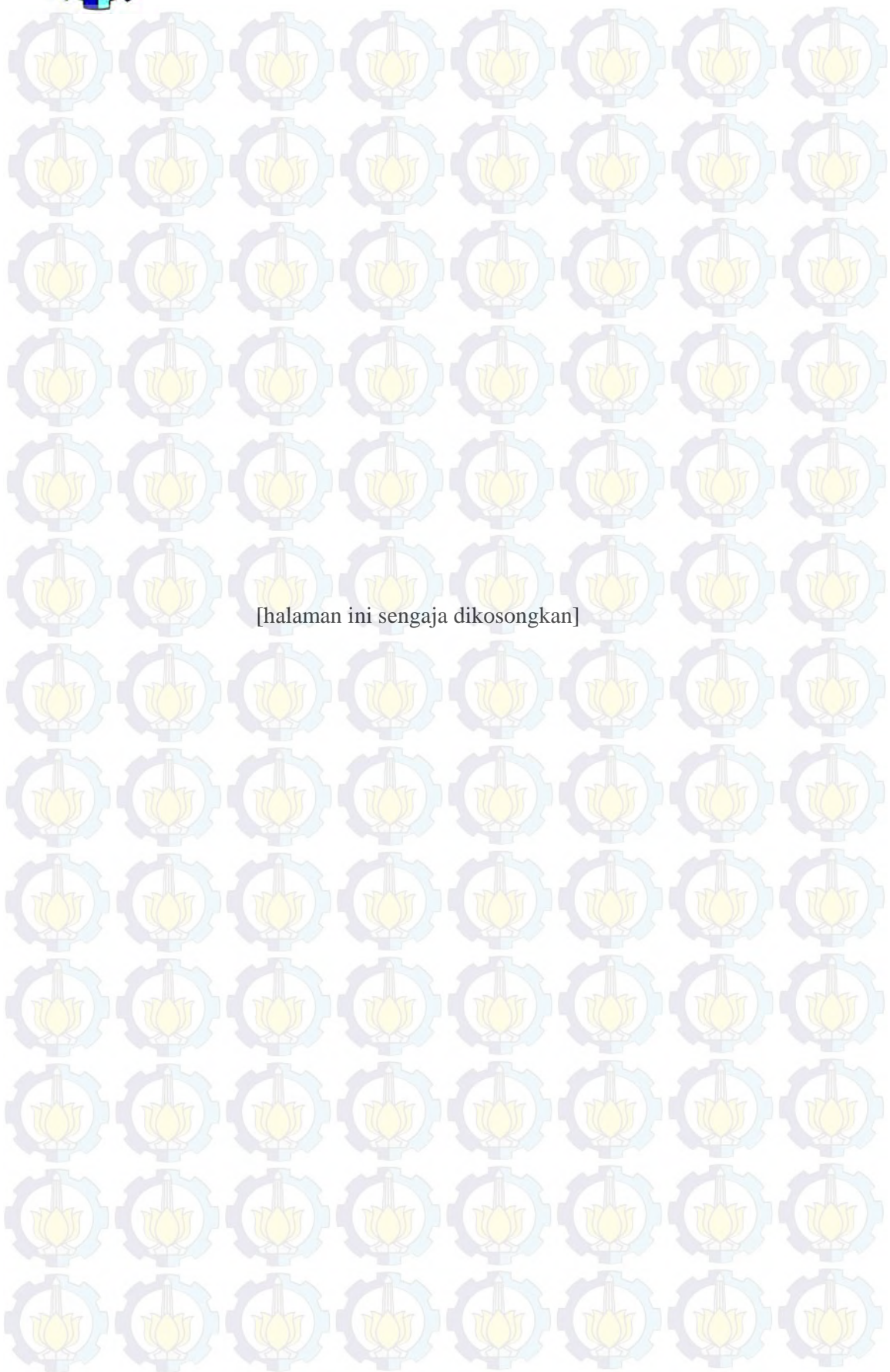
3.7.2. Metode optimasi GA

Langkah optimasi GA yang dilakukan pada penelitian ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 3.10. Diagram alir optimasi GA dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Penentuan batas atas dan batas bawah dari parameter-parameter yang akan dioptimasi.
2. Pengubahan nilai-nilai batas atas dan batas bawah yang bernilai diskrit menjadi bernilai iterger.
3. Penentuan *fitness* berdasarkan model BPNN.
4. Penentuan model optimasi GA yang meliputi:
 - a. Penentuan inisial populasi optimasi GA.
 - b. Penentuan jumlah generasi maksimum GA, dengan memeriksa apakah jumlah generasi maksimum
 - c. Proses seleksi dengan menggunakan 2 individu sebagai orang tua dengan menggunakan metode *Roulette Wheel*.
 - d. Proses *crossover* dengan nilai probabilitas *crossover* antara $[0,1]$ dan nilai *default* $(0,8)$.
 - e. Proses mutasi dengan nilai probabilitas mutasi antara $[0,1]$ dan nilai *default* $(0,2)$. Hasil proses mutasi sebagai individu turunan (*offspring*).
 - f. Perhitungan nilai *fitness* orang tua dan *offspring*.
 - g. Perbandingan nilai *fitness* orang tua dengan *fitness* turunan. Bila *fitness* orang tua lebih besar dari pada *fitness offspring* maka individu sebagai orang tua tersebut akan dipilih.
 - h. Penentuan dua individu yang dipilih sebagai individu dalam populasi untuk generasi berikutnya.
5. Apakah jumlah total individu dalam populasi sudah tercapai. Bila populasi belum tercukupi, maka lakukan perhitungan kembali dari langkah ke-4.
6. Pembentukan populasi baru.
7. Apakah kondisi jumlah generasi GA lebih besar dari pada generasi maksimum sudah tercapai. Bila kondisi tersebut belum tercapai, maka lakukan perhitungan kembali dari langkah ke-4 sampai dengan ke-6.
8. Hasil optimasi GA yang berupa nilai optimum parameter-parameter WEDM.



Gambar 3.10. Diagram alir metode optimasi GA



[halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB IV

OPTIMASI DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Eksperimen

Pelaksanaan eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan parameter-parameter yang terdapat pada mesin WEDM CHMER 32GF. Parameter tersebut adalah *arc on time* (AN), *on time* (ON), *open voltage* (OV), *off time* (OFF), dan *servo voltage* (SV). Kelima parameter tersebut diduga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap tebal lapisan *recast* dan kekasaran permukaan benda kerja, serta pengaruhnya terhadap *microcrack*.

Pengambilan data untuk respon tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* benda kerja dilakukan replikasi sebanyak dua kali. Tabel 4.1 menunjukkan data tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* benda kerja yang diperoleh selama eksperimen.

Tabel 4.1 Data hasil eksperimen WEDM

| No | AN | ON | OV | OFF | SV | Tebal Lapisan Recast (μm) | Kekasaran Permukaan (μm) | Microcrack ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$) |
|----|----|-----|-----|-----|----|--|---------------------------------------|--|
| 1 | 2 | 0,3 | 90 | 8 | 32 | 14,25 | 2,29 | 0,0095 |
| 2 | 2 | 0,3 | 100 | 9 | 36 | 19,40 | 2,26 | 0,0137 |
| 3 | 2 | 0,3 | 110 | 10 | 40 | 17,14 | 2,45 | 0,0166 |
| 4 | 2 | 0,4 | 90 | 8 | 36 | 17,22 | 2,51 | 0,0147 |
| 5 | 2 | 0,4 | 100 | 9 | 40 | 17,59 | 2,43 | 0,0187 |
| 6 | 2 | 0,4 | 110 | 10 | 32 | 15,05 | 2,64 | 0,0086 |
| 7 | 2 | 0,5 | 90 | 9 | 32 | 18,59 | 2,74 | 0,0176 |
| 8 | 2 | 0,5 | 100 | 10 | 36 | 19,00 | 2,86 | 0,0200 |
| 9 | 2 | 0,5 | 110 | 8 | 40 | 20,13 | 3,52 | 0,0119 |
| 10 | 3 | 0,3 | 90 | 10 | 40 | 18,22 | 2,38 | 0,0174 |
| 11 | 3 | 0,3 | 100 | 8 | 32 | 16,79 | 2,21 | 0,0172 |
| 12 | 3 | 0,3 | 110 | 9 | 36 | 19,77 | 2,85 | 0,0163 |
| 13 | 3 | 0,4 | 90 | 9 | 40 | 19,99 | 2,86 | 0,0160 |
| 14 | 3 | 0,4 | 100 | 10 | 32 | 16,16 | 2,42 | 0,0124 |
| 15 | 3 | 0,4 | 110 | 8 | 36 | 19,00 | 3,33 | 0,0137 |
| 16 | 3 | 0,5 | 90 | 10 | 36 | 19,32 | 2,51 | 0,0330 |
| 17 | 3 | 0,5 | 100 | 8 | 40 | 22,37 | 3,25 | 0,0394 |
| 18 | 3 | 0,5 | 110 | 9 | 32 | 19,93 | 3,79 | 0,0222 |
| 19 | 2 | 0,3 | 90 | 8 | 32 | 15,77 | 2,23 | 0,0066 |
| 20 | 2 | 0,3 | 100 | 9 | 36 | 19,44 | 2,23 | 0,0148 |
| 21 | 2 | 0,3 | 110 | 10 | 40 | 17,45 | 2,83 | 0,0103 |
| 22 | 2 | 0,4 | 90 | 8 | 36 | 17,03 | 2,44 | 0,0150 |



| No | AN | ON | OV | OFF | SV | Tebal Lapisan Recast (μm) | Kekasaran Permukaan (μm) | Microcrack ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$) |
|----|----|-----|-----|-----|----|--|---------------------------------------|--|
| 23 | 2 | 0,4 | 100 | 9 | 40 | 19,30 | 2,72 | 0,0194 |
| 24 | 2 | 0,4 | 110 | 10 | 32 | 16,50 | 2,81 | 0,0162 |
| 25 | 2 | 0,5 | 90 | 9 | 32 | 18,71 | 2,20 | 0,0117 |
| 26 | 2 | 0,5 | 100 | 10 | 36 | 18,73 | 2,94 | 0,0134 |
| 27 | 2 | 0,5 | 110 | 8 | 40 | 20,08 | 3,67 | 0,0303 |
| 28 | 3 | 0,3 | 90 | 10 | 40 | 17,02 | 2,56 | 0,0183 |
| 29 | 3 | 0,3 | 100 | 8 | 32 | 16,36 | 2,30 | 0,0102 |
| 30 | 3 | 0,3 | 110 | 9 | 36 | 18,79 | 2,91 | 0,0141 |
| 31 | 3 | 0,4 | 90 | 9 | 40 | 20,51 | 2,43 | 0,0175 |
| 32 | 3 | 0,4 | 100 | 10 | 32 | 16,66 | 2,78 | 0,0145 |
| 33 | 3 | 0,4 | 110 | 8 | 36 | 18,50 | 3,28 | 0,0184 |
| 34 | 3 | 0,5 | 90 | 10 | 36 | 19,59 | 2,83 | 0,0214 |
| 35 | 3 | 0,5 | 100 | 8 | 40 | 21,92 | 3,57 | 0,0221 |
| 36 | 3 | 0,5 | 110 | 9 | 32 | 20,40 | 3,56 | 0,0193 |

Sumber: Hasil pengukuran

4.2 Metode Peramalan BPNN

Proses peramalan dengan menggunakan BPNN dilakukan dengan mengikuti diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.9.

4.2.1 Data input BPNN

Data input pelatihan BPNN berasal dari data eksperimen WEDM yang telah dilakukan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Data eksperimen yang berupa parameter input dan parameter respon tersebut disusun dalam bentuk matriks.

4.2.2 Preprocessing data BPNN

Preprocessing dilakukan terhadap data yang akan digunakan sebagai *input layer* dan *output layer* pada pelatihan jaringan BPNN. Proses ini digunakan untuk melakukan normalisasi data eksperimen yang memiliki satuan dan interval yang berbeda-beda menjadi data yang non-dimensional dengan interval diantara $[-1, 1]$. *Preprocessing* dilakukan dengan bantuan perangkat lunak. Fungsi *mapminmax* yang ada di perangkat lunak digunakan untuk melakukan *preprocessing* pada pelatihan BPNN. Hasil normalisasi dari data eksperimen WEDM untuk setiap parameter input dan parameter respon ditunjukkan pada Tabel 4.2.



Tabel 4.2 Data hasil *preprocessing* pada peramalan BPNN

| No. | AN | ON | OV | OFF | SV | Tebal Lapisan Recast (μm) | Kekasaran Permukaan (μm) | Microcrack ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$) |
|-----|----|----|----|-----|----|--|---------------------------------------|--|
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1,0000 | -0,8868 | -0,8232 |
| 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0,2685 | -0,9245 | -0,5671 |
| 3 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -0,2882 | -0,6855 | -0,3902 |
| 4 | -1 | 0 | -1 | -1 | 0 | -0,2685 | -0,6101 | -0,5061 |
| 5 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | -0,1773 | -0,7107 | -0,2622 |
| 6 | -1 | 0 | 1 | 1 | -1 | -0,8030 | -0,4465 | -0,8780 |
| 7 | -1 | 1 | -1 | 0 | -1 | 0,0690 | -0,3208 | -0,3293 |
| 8 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0,1700 | -0,1698 | -0,1829 |
| 9 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0,4483 | 0,6604 | -0,6768 |
| 10 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -0,0222 | -0,7736 | -0,3415 |
| 11 | 1 | -1 | 0 | -1 | -1 | -0,3744 | -0,9874 | -0,3537 |
| 12 | 1 | -1 | 1 | 0 | 0 | 0,3596 | -0,1824 | -0,4085 |
| 13 | 1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0,4138 | -0,1698 | -0,4268 |
| 14 | 1 | 0 | 0 | 1 | -1 | -0,5296 | -0,7233 | -0,6463 |
| 15 | 1 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0,1700 | 0,4214 | -0,5671 |
| 16 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0 | 0,2488 | -0,6101 | 0,6098 |
| 17 | 1 | 1 | 0 | -1 | 1 | 1,0000 | 0,3208 | 1,0000 |
| 18 | 1 | 1 | 1 | 0 | -1 | 0,3990 | 1,0000 | -0,0488 |
| 19 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -0,6256 | -0,9623 | -1,0000 |
| 20 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0,2783 | -0,9623 | -0,5000 |
| 21 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -0,2118 | -0,2075 | -0,7744 |
| 22 | -1 | 0 | -1 | -1 | 0 | -0,3153 | -0,6981 | -0,4878 |
| 23 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,2438 | -0,3459 | -0,2195 |
| 24 | -1 | 0 | 1 | 1 | -1 | -0,4458 | -0,2327 | -0,4146 |
| 25 | -1 | 1 | -1 | 0 | -1 | 0,0985 | -1,0000 | -0,6890 |
| 26 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0,1034 | -0,0692 | -0,5854 |
| 27 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0,4360 | 0,8491 | 0,4451 |
| 28 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -0,3177 | -0,5472 | -0,2866 |
| 29 | 1 | -1 | 0 | -1 | -1 | -0,4803 | -0,8742 | -0,7805 |
| 30 | 1 | -1 | 1 | 0 | 0 | 0,1182 | -0,1069 | -0,5427 |
| 31 | 1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0,5419 | -0,7107 | -0,3354 |
| 32 | 1 | 0 | 0 | 1 | -1 | -0,4064 | -0,2704 | -0,5183 |
| 33 | 1 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0,0468 | 0,3585 | -0,2805 |
| 34 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0 | 0,3153 | -0,2075 | -0,0976 |
| 35 | 1 | 1 | 0 | -1 | 1 | 0,8892 | 0,7233 | -0,0549 |
| 36 | 1 | 1 | 1 | 0 | -1 | 0,5148 | 0,7107 | -0,2256 |

Sumber: Hasil perhitungan



4.2.3 Arsitektur jaringan BPNN

Arsitektur BPNN terdiri atas jumlah *layer*, jumlah *neuron* dalam setiap *layer*, fungsi aktivasi dan fungsi *training*. Banyak metode yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya untuk menentukan arsitektur jaringan agar diperoleh model yang terbaik. Metode-metode tersebut antara lain adalah metode *trial and error* (Changyu, 2007; Shi, 2010; Shi, 2012), metode matriks ortogonal (Chen, 2008; Huang, 2010), dan metode perhitungan tertentu (Shi, 2003; Zain, 2010; Cheng, 2012). Penelitian ini menggunakan metode perhitungan tertentu untuk mengetahui jumlah *neuron* pada setiap *layer* ditentukan berdasarkan dan dengan rancangan *full factorial*. Perhitungan yang digunakan adalah “ $n/2$,” “ $1n$,” “ $2n$,” dan “ $2n+1$,” dimana n adalah jumlah *input layer* (Zain, 2010).

Pada penelitian ini, parameter-parameter BPNN yang divariasikan dalam pengembangan BPNN dibatasi pada:

- Jumlah *hidden layer*, yakni 1 dan 2 *hidden layer*.
- Jumlah neuron dalam setiap *hidden layer*, yaitu 8 dan 10.
- Fungsi aktivasi, yaitu *logsig* dan *tansig*.
- Fungsi *training*, yaitu *trainrp*.

Tiga parameter memiliki dua level dan satu parameter memiliki satu level, sehingga rancangan *full factorial* yang digunakan adalah $2^3 \times 1^1$. Dengan demikian rancangan tersebut memiliki kombinasi arsitektur sebanyak 8 jaringan. Semua kombinasi menggunakan *learning rate* sebesar 0.1 dan *performance goal* sebesar 1×10^{-4} . Tabel 4.3 menunjukkan 8 kombinasi jaringan yang akan digunakan untuk melakukan pengembangan BPNN. Kombinasi jaringan yang dipilih adalah kombinasi jaringan yang menghasilkan MSE terkecil.

Hasil perhitungan arsitektur BPNN yang ditunjukkan pada Tabel 4.3 menyatakan bahwa nilai MSE terkecil adalah sebesar 0,0441 dan dihasilkan oleh kombinasi ke-6. Bentuk arsitektur tersebut memiliki kombinasi jaringan 5-8-8-3, fungsi aktivasinya adalah *tansig* dan fungsi pelatihan adalah *trainrp*. Jaringan 5-8-8-3 memiliki arti bahwa jaringan mempunyai 5 *input layer*, 2 buah *hidden layer* dengan 8 buah *neuron* pada masing-masing *hidden layer*, dan 3 *output layer*, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.1.



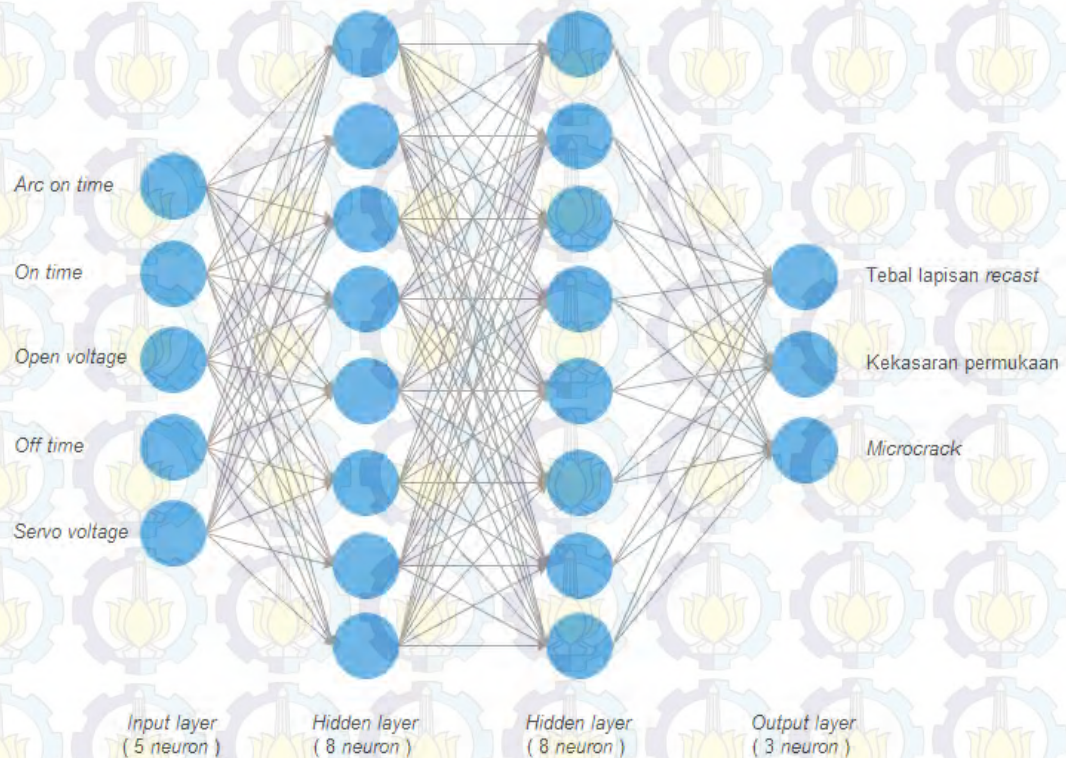
Tabel 4.3 Level Parameter BPNN yang divariasikan

| Kombinasi ke- | Hidden layer | Jumlah neuron | Fungsi aktivasi | Fungsi training | MSE |
|---------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|--------|
| 1 | 1 | 8 | logsig | trainrp | 0,0484 |
| 2 | 1 | 8 | tansig | trainrp | 0,0488 |
| 3 | 1 | 10 | logsig | trainrp | 0,0496 |
| 4 | 1 | 10 | tansig | trainrp | 0,0451 |
| 5 | 2 | 8 | logsig | trainrp | 0,0454 |
| 6 | 2 | 8 | tansig | trainrp | 0,0441 |
| 7 | 2 | 10 | logsig | trainrp | 0,0472 |
| 8 | 2 | 10 | tansig | trainrp | 0,0499 |

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.4 Rincian model BPNN

| Parameter input | Hidden layer | Jumlah neuron | Data training | Data testing | Output BPNN |
|--|--------------|---------------|---------------|--------------|--|
| 1. Arc on time 2. On time 3. Open voltage 4. Off time 5. Servo voltage | 2 | 8 | 29 | 7 | 1. Tebal lapisan recast 2. Kekasaran permukaan 3. Microcrack |



Gambar 4.1. Arsitektur jaringan BPNN



4.2.4 Kriteria pemberhentian (*stopping criteria*) peramalan BPNN

Penghentian peramalan BPNN dilakukan dengan menggunakan kriteria sebagai berikut (Matlab, 2014):

1. Jumlah epoch maksimum.
2. Waktu iterasi maksimum.
3. Nilai performa maksimum peramalan BPNN.
4. Nilai gradien maksimum
5. Jumlah epoch validasi maksimum

Bila salah satu kriteria telah tercapai, maka pelatihan BPNN akan dihentikan.

4.2.5 Inisiasi nilai bobot dan bias

Penentuan nilai bobot dan bias awal diawali dengan nilai bobot dan bias tertentu, yaitu dengan cara memberikan nilai pada *net.IW*, *net.LW* dan *net.b* di perangkat lunak. Nilai bobot dan bias yang tercantun pada *net.IW*, *net.LW* dan *net.b*, dipilih secara random. Fungsi bobot dan bias dapat adalah sebagai berikut:

1. $net.IW\{1,1\}$ digunakan untuk menunjukkan nilai bobot dari *input layer* ke *hidden layer 1*.
2. $net.LW\{2,1\}$ digunakan untuk menunjukkan nilai bobot dari *hidden layer 1* ke *hidden layer 2*
3. $net.LW\{3,2\}$ digunakan untuk menunjukkan nilai bobot dari *hidden layer 2* ke *output layer*
4. $net.b\{1\}$ digunakan untuk menunjukkan nilai bias dari *input layer* ke *hidden layer 1*.
5. $net.b\{2\}$ digunakan untuk menunjukkan nilai bias dari *hidden layer 1* ke *hidden layer 2*
6. $net.b\{3\}$ digunakan untuk menunjukkan nilai bias dari *hidden layer 2* ke *output layer*



4.2.6 Data peramalan BPNN

Data peramalan BPNN terdiri atas data *training*, data *testing*, dan data validasi. Perbandingan jumlah data yang digunakan untuk *training*, *testing* dan validasi sebagai *default* pada perangkat lunak adalah 60% : 20% : 20%. Pelatihan BPNN pada penelitian ini menggunakan perbandingan data *training* dan data *testing* sebesar 80% : 20%. Seting yang dilakukan pada perangkat lunak adalah sebagai berikut:

$$\text{net.divideParam.trainRatio} = 80/100$$

$$\text{net.divideParam.testRatio} = 20/100$$

Tabel 4.5 Data *training* dan *testing* yang dipilih secara acak

| Jenis data | Nomor urut data ke- |
|-----------------|---|
| <i>Training</i> | 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, dan 36 |
| <i>Testing</i> | 1, 8, 15, 18, 24, 26, dan 29 |

Data eksperimen yang digunakan untuk melakukan pelatihan BPNN berjumlah 36. Dengan demikian 26 data digunakan untuk *training*, 5 data digunakan untuk *testing*, dan 5 data digunakan untuk validasi. Penentuan data *training* dan data *testing* tersebut dilakukan secara acak/*random* oleh perangkat lunak, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4.

4.2.7 Pelatihan jaringan BPNN

Peramalan BPNN merupakan perhitungan numerik untuk memprediksi nilai *output*. Perhitungan numerik pada input peramalan BPNN yang terkoreksi oleh seting parameter-parameter BPNN digunakan untuk memprediksi nilai *output* hasil peramalan BPNN.

Pada awal tahap pelatihan BPNN digunakan nilai bobot dan bias yang diperoleh secara random. Perubahan nilai bobot dan bias dilakukan secara berkelanjutan hingga *stopping criteria* tercapai.

Fungsi aktivasi *tansig* digunakan untuk melakukan inisialisasi pada *hidden layer*. Fungsi aktivasi ini berupa fungsi transfer sigmoid tangen hiperbolik yang memiliki interval $[-1, 1]$. Fungsi aktivasi *purelin* (fungsi identitas) digunakan untuk melakukan inisialisasi pada *output layer*.



Fungsi *resilient back propagation* (trainrp) digunakan untuk melakukan *training* jaringan BPNN, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Fungsi ini merupakan fungsi pelatihan jaringan yang melakukan pembaharuan (*update*) terhadap nilai-nilai bobot dan bias sesuai dengan pelatihan BPNN. Jenis *training* ini merupakan jenis *training* yang paling cepat untuk pelatihan BPNN dan paling banyak direkomendasikan, walaupun memerlukan memori untuk proses yang lebih besar (Matlab, 2010).

| Algorithms | |
|----------------|--------------------------|
| Data Division: | Random (dividerand) |
| Training: | RProp (trainrp) |
| Performance: | Mean Squared Error (mse) |
| Calculations: | MEX |

Gambar 4.2. Model BPNN

Parameter *learning rate* yang digunakan adalah sebesar 0,1. Nilai *learning rate* yang terlalu besar akan mempercepat waktu proses *running*, namun algoritma menjadi tidak stabil. Di sisi lain, semakin kecil nilai *learning rate* yang digunakan maka algoritma menjadi lebih stabil, tetapi waktu proses *running* akan menjadi lebih lambat.

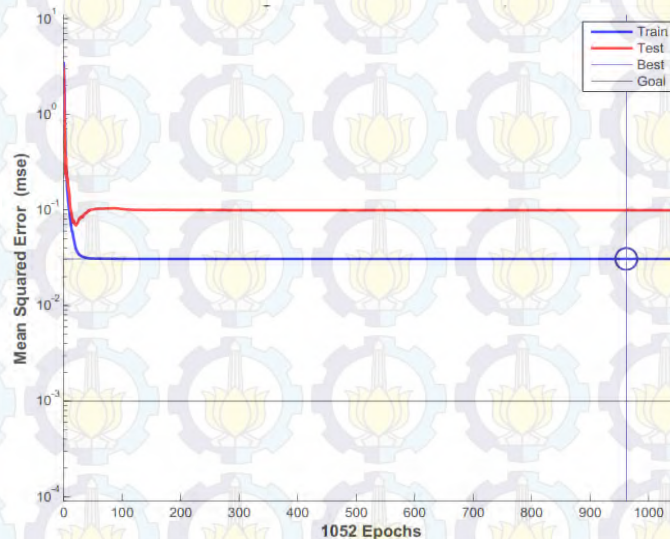
4.2.8 Hasil peramalan dengan BPNN

Peramalan BPNN akan berhenti bila salah satu kriteria pemberhentian (*stopping criteria*), yaitu jumlah epoch maksimum, waktu iterasi maksimum, nilai performa maksimum, nilai gradien maksimum, dan jumlah epoch validasi maksimum. Performansi pelatihan BPNN telah mencapai salah satu *stopping criteria*, yaitu nilai gradien maksimum. Nilai gradien maksimum hasil peramalan adalah sebesar $9,25 \times 10^{-11}$ dan nilai tersebut berada dibawah nilai minimum dari nilai gradien maksimum yang ditentukan, yaitu sebesar 1×10^{-10} .

Data *testing* digunakan untuk melakukan pengujian model BPNN dan menghasilkan tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* respon hasil eksperimen, hasil peramalan dengan BPNN dan *error* (selisih antara hasil eksperimen dengan hasil BPNN) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.6. Nilai MSE dari model BPNN dengan menggunakan data *testing* adalah sebesar 0,0992.



Nilai MSE data *testing* dan MSE total dari data *training* dan data *testing* untuk respon tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* ditunjukkan pada Tabel 4.7.



Gambar 4.3. Grafik nilai *epoch* untuk MSE *training* dan *testing* dari peramalan dengan BPNN

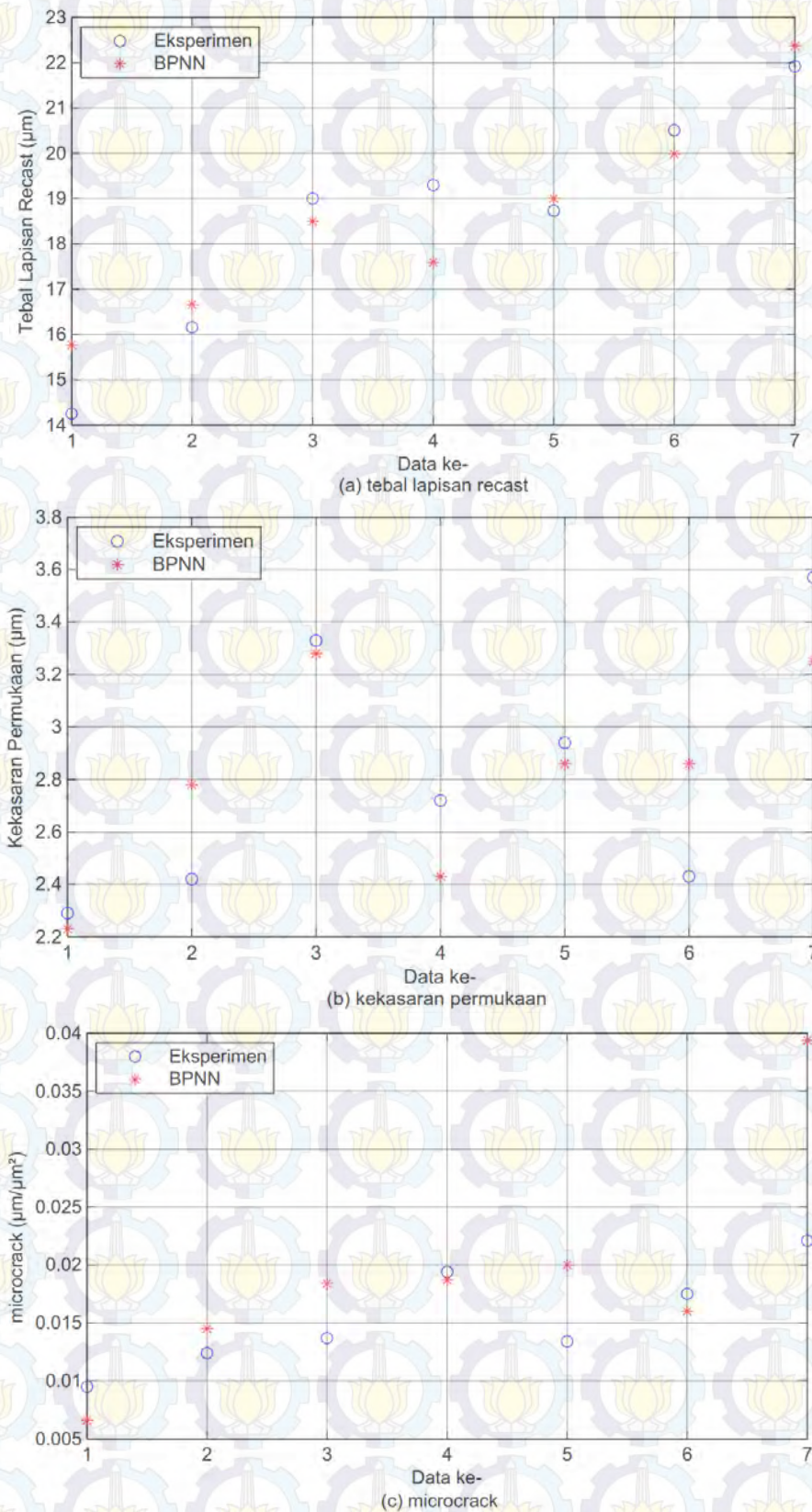
Tabel 4.6 Data *testing* pada tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* respon hasil eksperimen, hasil peramalan dengan BPNN dan *error* (selisih antara hasil eksperimen dengan hasil BPNN)

| No | Tebal Lapisan Recast (μm) | | | Kekasaran Permukaan (μm) | | | Microcrack ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$) | | |
|----|--|-------|-----------|---------------------------------------|------|-----------|--|--------|-----------|
| | Eksp. | BPNN | Error (%) | Eksp. | BPNN | Error (%) | Eksp. | BPNN | Error (%) |
| 1 | 14,25 | 15,77 | -10,68 | 2,29 | 2,23 | 2,62 | 0,0095 | 0,0066 | 30,53 |
| 8 | 19,00 | 19,12 | -0,68 | 2,86 | 2,47 | 13,57 | 0,0200 | 0,0241 | -20,50 |
| 15 | 19,00 | 18,50 | 2,64 | 3,33 | 3,28 | 1,50 | 0,0137 | 0,0184 | -34,31 |
| 18 | 19,93 | 20,40 | -2,38 | 3,79 | 3,56 | 6,07 | 0,0222 | 0,0193 | 13,06 |
| 24 | 16,50 | 15,05 | 8,81 | 2,81 | 2,64 | 6,05 | 0,0162 | 0,0086 | 46,91 |
| 26 | 18,73 | 19,12 | -2,09 | 2,94 | 2,47 | 15,92 | 0,0134 | 0,0241 | -79,85 |
| 29 | 16,36 | 16,79 | -2,63 | 2,30 | 2,21 | 3,91 | 0,0102 | 0,0172 | -68,63 |

Sumber: Hasil pengukuran dan *training*

Tabel 4.7 Nilai MSE data *testing* dan MSE total untuk data *training* dan data *testing* pada respon tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack*

| Respon | MSE data <i>testing</i> | MSE total untuk data <i>training</i> dan data <i>testing</i> |
|--|-------------------------|--|
| Tebal Lapisan Recast (μm) | 0,0454 | 0,0141 |
| Kekasaran Permukaan (μm) | 0,1052 | 0,0447 |
| Microcrack ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$) | 0,1471 | 0,0731 |



Gambar 4.4. Grafik data eksperimen dan *outputtesting* BPNN untuk respon (a) tebal lapisan *recast*, (b) kekasaran permukaan dan (c) *microcrack*



Gambar 4.5 menunjukkan grafik data eksperimen dan *output testing* BPNN untuk respon tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack*. Nilai eror terbesar pada respon tebal lapisan *recast* adalah sebesar 10,68%, pada respon kekasaran permukaan adalah sebesar 15,92%, dan pada respon *microcrack* adalah sebesar 68,63%. Nilai-nilai persen eror tersebut ada memiliki nilai eror negatif dan ada juga yang memiliki nilai eror positif. Nilai persen eror negatif terjadi bila nilai hasil eksperimen lebih besar dari pada nilai hasil peramalan BPNN, sedangkan nilai persen eror positif terjadi bila nilai hasil eksperimen lebih kecil dari pada nilai hasil peramalan BPNN.

Data tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* respon hasil eksperimen, hasil peramalan dengan BPNN dan *error* (selisih antara hasil eksperimen dengan hasil peramalan) ditunjukkan pada Lampiran G. Grafik data eksperimen dan data output pelatihan BPNN pada respon (a) tebal lapisan *recast*, (b) kekasaran permukaan dan (c) *microcrack* ditunjukkan pada Lampiran H. Nilai-nilai bobot dan bias akhir peramalan ditunjukkan pada Lampiran I.



4.3 Metode Optimasi GA

GA merupakan metode optimasi yang dapat digunakan untuk menentukan parameter-parameter proses WEDM yang menghasilkan nilai respon yang optimum. Proses optimasi GA menggunakan data yang diperoleh dari peramalan dengan BPNN, sehingga kedua metode tersebut saling berhubungan, seperti yang ditunjukkan oleh bahasa pemrograman pada Lampiran J. Proses optimasi GA dilakukan dengan mengikuti diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.10.

4.3.1 Penentuan batas atas dan batas bawah dari parameter yang dioptimasi

Nilai optimal hasil optimasi yang diperoleh dengan metode GA perlu dibatasi agar tidak berada diluar nilai interval parameter penelitian. Tabel 4.8 menunjukkan nilai-nilai batas bawah dan batas atasnya internal dari parameter-parameter WEDM yang ingin dicapai.

Tabel 4.8 Batas bawah dan batas atas parameter optimasi

| Parameter | Unit | Simbol | Batas | | Interval |
|----------------------|---------|--------|-------|------|----------|
| | | | bawah | atas | |
| <i>Arc on time</i> | μ s | AN | 2 | 3 | 1 |
| <i>On time</i> | μ s | ON | 0,3 | 0,5 | 0,1 |
| <i>Open voltage</i> | volt | OV | 90 | 110 | 5 |
| <i>Off time</i> | μ s | OFF | 8 | 10 | 1 |
| <i>Servo voltage</i> | volt | SV | 32 | 40 | 1 |

4.3.2 Pengubahan batas atas dan batas bawah yang bernilai diskrit menjadibernilai integer

Optimasi dengan menggunakan GA diharapkan menghasilkan nilai parameter-parameter optimal dari proses WEDM yang berupabilangan integer, sehingga nilai hasil optimasi GA dapat diaplikasikan secara langsung pada mesin WEDM. Parameter-parameter *arc on time*, *off time*, dan *servo voltage* memiliki interval dengan batas atas dan batas bawah yang berupa bilangan integer. Parameter *on time* dan *open voltage* memiliki interval dengan batas atas dan batas bawah yang bersifat diskrit. Oleh karena itu, untuk kedua parameter tersebut dilakukan penyetingan untuk merubah nilai diskrit ke nilai integer.



Batas parameter *on time* memiliki nilai desimal. Bila digunakan bilangan integer secara langsung, maka nilai optimal *on time* tidak terdefinisi pada interval tersebut. Oleh karena itu, nilai interval *on time* perlu ditetapkan secara diskrit, seperti yang ditunjukkan pada Lampiran K.1. Batas parameter *open voltage* memiliki nilai interval 5. Bilangan integer digunakan secara langsung, maka nilai optimal yang diperoleh tidak tepat di antara batas bawah dan batas atas dengan nilai interval 5, sehingga nilai range *open voltage* perlu ditetapkan secara diskrit. Lampiran K.2 menunjukkan seting nilai diskrit ke nilai integer dengan nama file di bahasa pemrograman *wireEDMMapVariables*.

4.3.3 Penentuan fungsi *fitness*

Fungsi *fitness* digunakan untuk menentukan kondisi optimal parameter dari respon yang ingin dicapai. Program perangkat lunak optimasi GA yang dilakukan untuk mencari seting parameter *arc on time*, *on time*, *open voltage*, *off time*, dan *servo voltage* pada proses WEDM agar menghasilkan tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* yang minimum ditunjukkan pada Lampiran K.3. Fungsi *fitness* untuk optimasi GA dari proses WEDM menggunakan file *wireEDMfitnessWithDisc* di bahasa pemrograman perangkat lunak.

4.3.4 Penentuan opsi untuk optimasi GA di perangkat lunak

Genetic algorithm options structure terdiri dari beberapa opsi untuk menyelesaikan optimasi GA. Opsi-opsi berupa fungsi '*gaoptimset*' dan fungsi *solver* '*ga*' dipilih untuk menjalankan langkah-langkah yang ditunjukkan pada Gambar 3.10, yaitu:

1. Penentuan inisial populasi: menggunakan jumlah populasi sebanyak 150.
2. Penentuan jumlah maksimum generasi optimasi GA: menggunakan jumlah generasi sebanyak 20.
3. Proses seleksi: menggunakan fungsi *Roulette Wheel*.
4. Proses *crossover*: menggunakan probabilitas *crossover* sebesar 0,6.
5. Proses mutasi: menggunakan probabilitas *crossover* sebesar 0,4.
6. Perhitungan nilai *fitness*.
7. Pemilihan individu orangtua.



8. Pemilihan individu *offspring*.
9. Penetapan 2 individu terbaik: menggunakan pemilihan individu orang tua atau *offspring* yang memiliki nilai *fitness* terbesar.
10. Pembentukan populasi baru: jumlah individu yang dipakai pada generasi berikutnya adalah sebanyak 50.
11. Kriteria pemeriksaan tercapai tidaknya generasi maksimum adalah sebesar 1×10^{-08} .

4.3.5 Hasil optimasi GA

Hasil optimal GA didapat dengan melakukan percobaan beberapa kali sehingga diperoleh seting parameter yang paling optimal. Perubahan seting tersebut dilakukan pada parameter jumlah populasi, probabilitas mutasi, dan probabilitas *crossover*. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai *fitness* dari fungsi *fitness* yang paling kecil berdasarkan nilai rata-rata dari respon tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* yang terkecil. Nilai dari fungsi *fitness* yang paling minimum menunjukkan bahwa *output* respon WEDM yang lebih baik dari pada eksperimen awal telah tercapai.

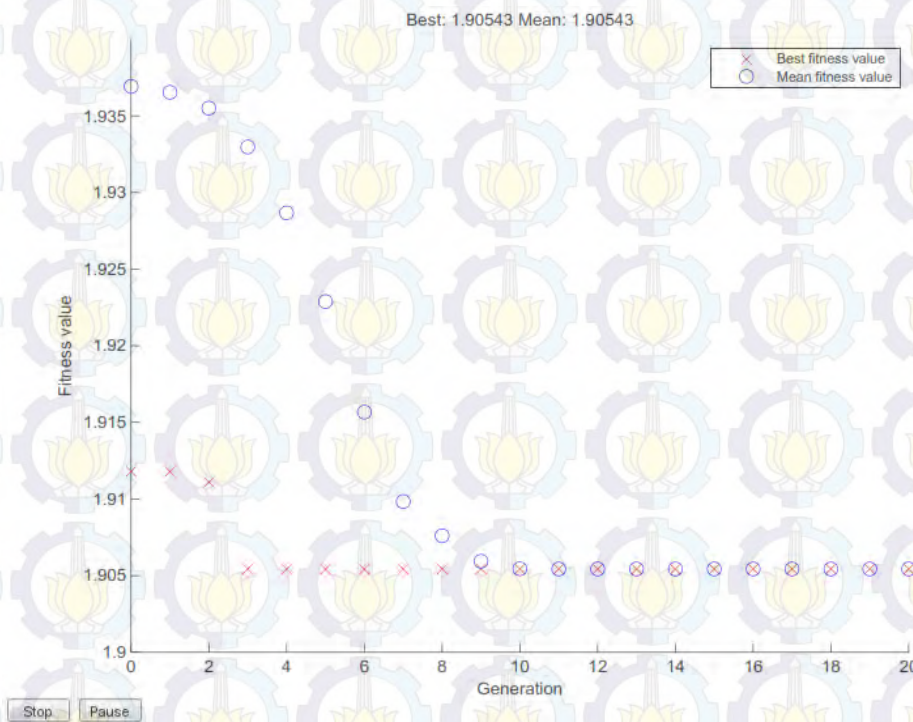
Proses optimasi GA memiliki beberapa *stopping criteria* untuk menghentikan program yang sedang berlangsung. Adapun *stopping criteria* untuk menghentikan program GA yaitu jumlah generasi maksimum telah tercapai dan nilai *fitness* terbaik minimum telah tercapai.

Gambar 4.6 menunjukkan grafik jumlah generasi terhadap nilai *fitness* dari optimasi GA. Jumlah generasi maksimum tercapai pada nilai *fitness* sebesar 1,90543. Seting optimal parameter-parameter *arc on time*, *on time*, *open voltage*, *off time*, dan *servo voltage* pada proses pemesinan WEDM dengan menggunakan metode GA ditunjukkan pada Tabel 4.9.



Tabel 4.9 Seting optimal parameter-parameter *arc on time*, *on time*, *open voltage*, *off time*, dan *servo voltage* pada proses pemesinan WEDM dengan menggunakan metode GA

| Parameter | Simbol | Satuan | Seting optimal |
|----------------------|--------|---------------|----------------|
| <i>Arc on time</i> | AN | μs | 2 |
| <i>On time</i> | ON | μs | 0,3 |
| <i>Open voltage</i> | OV | volt | 90 |
| <i>Off time</i> | OFF | μs | 10 |
| <i>Servo voltage</i> | SV | volt | 40 |



Gambar 4.5. Grafik generasi terhadap nilai *fitness* pada optimasi GA



4.4 Perbandingan antara respon hasil kombinasi awal dan kombinasi optimum

Kombinasi awal merupakan pengaturan kombinasi variabel proses yang biasa digunakan dalam proses pemotongan WEDM. Pada penelitian ini kombinasi awal diatur pada level tengah, yaitu pada level dua untuk variabel proses yang memiliki tiga level. Untuk variabel proses yang memiliki dua level kombinasi awal diatur pada level satu. Tujuan dari percobaan dengan menggunakan kombinasi awal ini adalah untuk mengetahui peningkatan karakteristik kinerja dari masing-masing respon baik secara individu maupun secara serentak. Hal ini dilakukan dengan membandingkan hasil respon sebelum dilakukan optimasi (kombinasi awal) dengan respon setelah dilakukan optimasi (kombinasi optimum). Pengaturan kombinasi variabel proses yang digunakan sebagai kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Pengaturan level kombinasi awal dan kombinasi optimum

| Parameter | Simbol | Kombinasi awal | Kombinasi optimal |
|----------------------|--------|----------------|-------------------|
| <i>Arc on time</i> | AN | 2 | 2 |
| <i>On time</i> | ON | 0,4 | 0,3 |
| <i>Open voltage</i> | OV | 100 | 90 |
| <i>Off time</i> | OFF | 9 | 10 |
| <i>Servo voltage</i> | SV | 36 | 40 |

Sumber: Hasil percobaan

Percobaan dengan menggunakan kombinasi awal dilakukan dengan replikasi sebanyak tiga kali. Hasil masing-masing dari percobaan pada kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 4.11 dan Tabel 4.12.

Tabel 4.11 Respon percobaan kondisi awal

| Percobaan | Tebal Lapisan <i>Recast</i> (μm) | Kekasaaran Permukaan (μm) | <i>Microcracks</i> ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$) |
|-----------|--|---|---|
| 1 | 17,48 | 2,59 | 0,02175 |
| 2 | 18,71 | 2,41 | 0,02145 |
| 3 | 18,33 | 2,54 | 0,01875 |
| Rata-rata | 18,17 | 2,51 | 0,02065 |

Sumber: Hasil percobaan

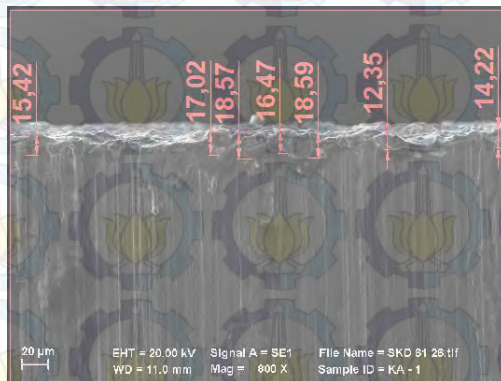


Tabel 4.12 Respon percobaan kondisi optimal

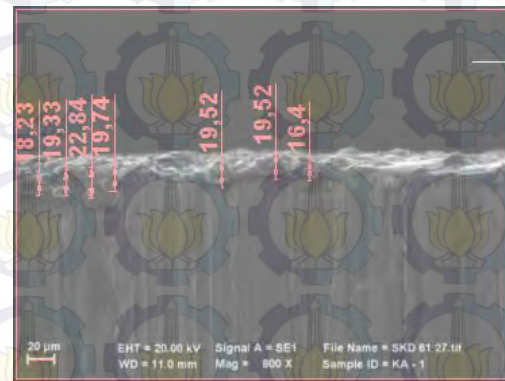
| Percobaan | Tebal Lapisan Recast (μm) | Kekasaaran Permukaan (μm) | Microcracks ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$) |
|-----------|--|--|---|
| 1 | 14,163 | 2,21 | 0,0029 |
| 2 | 14,84 | 2,07 | 0,0043 |
| 3 | 13,97 | 2,27 | 0,0064 |
| Rata-rata | 14,33 | 2,18 | 0,004533 |

Sumber: Hasil percobaan

Gambar 4.7 menunjukkan tebal lapisan *recast* pada kondisi awal dan kondisi optimum. Pada Gambar 4.7a dan 4.7b menunjukkan tebal lapisan *recast* hasil kombinasi awal, sedangkan pada gambar 4.7c dan 4.7d menunjukkan tebal lapisan *recast* hasil kombinasi optimum. Pada kombinasi awal, tebal lapisan *recast* yang terjadi cenderung lebih banyak dan lebih besar dibandingkan tebal lapisan *recast* yang terjadi pada kombinasi optimum yang cenderung lebih sempit dan tipis.



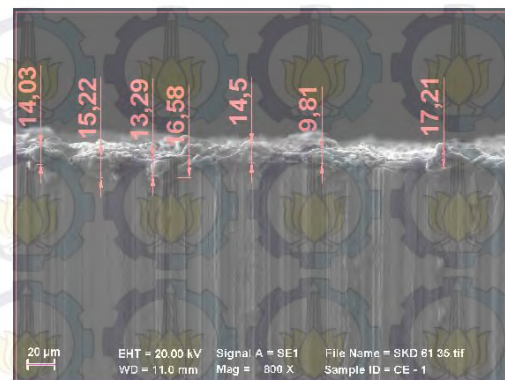
(a) Kombinasi awal replikasi 1



(b) Kombinasi awal replikasi 2



(c) Kombinasi optimal replikasi 1

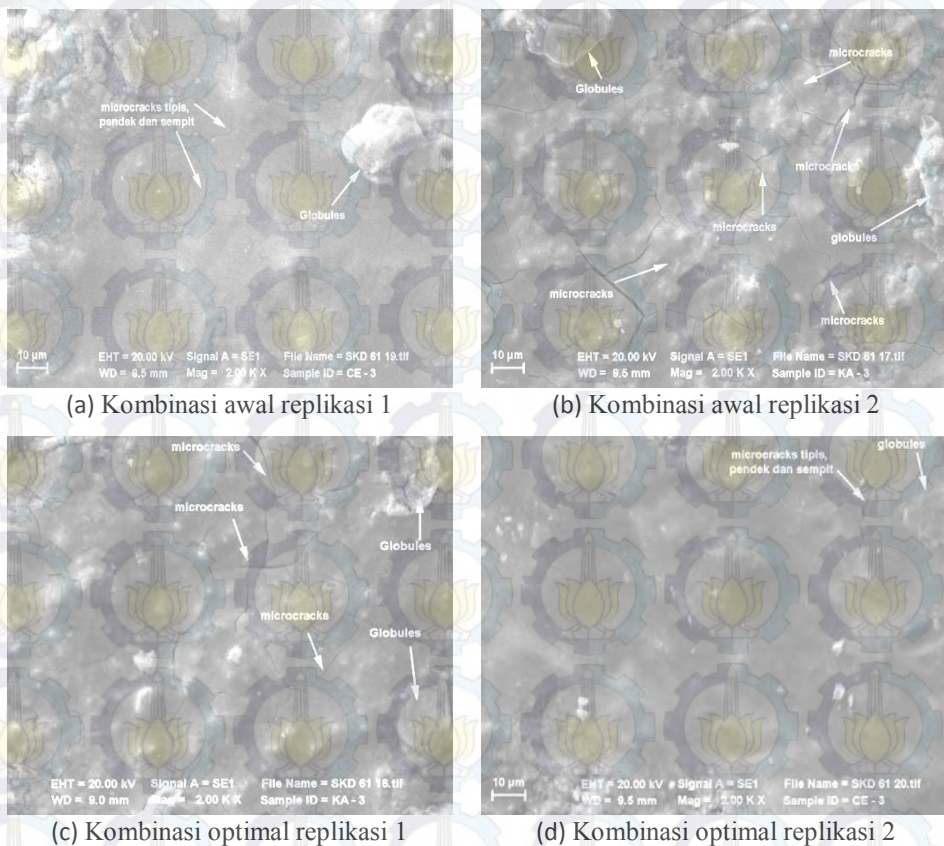


(d) Kombinasi optimal replikasi 2

Gambar 4.6. Hasil pengukuran tebal lapisan *recast* dari (a) dan (b) kombinasi awal, (c) dan (d) Kombinasi optimum



Gambar 4.8 menunjukkan *microcracks* yang terjadi pada kombinasi awal dengan kombinasi optimum. Pada Gambar 4.8a dan 4.8b menunjukkan *microcracks* hasil kombinasi awal, sedangkan pada gambar 4.8c dan 4.8d menunjukkan *microcracks* hasil kombinasi optimum. Pada kombinasi awal, *microcracks* yang terjadi cenderung lebih banyak dan lebih besar dibandingkan *microcracks* yang terjadi pada kombinasi optimum yang cenderung lebih sempit dan tipis.



Gambar 4.7. *Microcracks* yang terjadi pada lapisan *recast* dari (a) dan (b) Kombinasi awal, (c) dan (d) Kombinasi optimum

Berdasarkan Gambar 4.8, *microcracks* yang lebar dan panjang terjadi karena adanya peningkatan nilai *on time*, *servo voltage*, *arc on time* dan *open voltage* yang diiringi dengan penurunan nilai *off time*. Dengan meningkatnya nilai *on time*, jumlah panas yang ditransfer ke permukaan semakin besar, sehingga logam yang mencair juga semakin banyak. Selain itu, dengan meningkatnya nilai *servo voltage*, erosi bunga api yang dihasilkan cenderung terkonsentrasi pada



permukaan lapisan *recast*, sehingga menyebabkan *microcracks*. Selain kedua faktor tersebut, faktor *off time* juga mempengaruhi terjadinya *microcracks*. Faktor *off time* yang singkat menyebabkan waktu proses pembilasan geram berjalan tidak sempurna, karena cairan dielektrik tidak mempunyai cukup banyak waktu untuk membawa geram yang terbentuk. Hal ini juga menyebabkan terjadinya *globules*, puing-puing geram dan *blowholes* pada lapisan *recast*. Selain itu, terjadinya *microcracks* juga dipengaruhi oleh *heat input*. Parameter-parameter pada WEDM yang mempengaruhi *heat input* adalah *open voltage*, *arc on time* dan *on time*. Heat input yang tinggi akan menyebabkan *internal stress* akan semakin tinggi. *Internal stress* merupakan gaya dalam yang terjadi akibat kontraksi/ekspansi termal. Ekspansi/kontraksi termal menyebabkan (*microcracks*) retakan pada permukaan benda kerja. Dengan demikian, pada nilai KRP yang tinggi dapat memberikan peluang terjadinya (*microcracks*) retakan menembus benda kerja juga semakin tinggi.

Untuk mengetahui adanya perbedaan antara nilai respon kombinasi awal dengan kombinasi optimum, maka dilakukan validasi secara statistik dengan menggunakan uji rata-rata untuk masing-masing respon. Hipotesis untuk pengujian ini adalah sebagai berikut:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \geq \mu_2$$

H_0 akan ditolak jika nilai P_{value} kurang dari α . Pada pengujian ini, digunakan α sebesar 5%. Langkah-langkah uji kesamaan rata-rata untuk kepadatan retakan permukaan (KRP) secara rinci ditunjukkan pada Lampiran L.

Tabel 4.13 Hasil uji kesamaan rata-rata

| Respon | P-value | Keterangan | Kesimpulan |
|--|---------|---------------|----------------------|
| Tebal Lapisan <i>Recast</i> (μm) | 0.000 | H_0 ditolak | Rata-rata tidak sama |
| Kekasaran Permukaan (μm) | 0.000 | H_0 ditolak | Rata-rata tidak sama |
| <i>Microcracks</i> ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$) | 0.000 | H_0 ditolak | Rata-rata tidak sama |

Sumber: Hasil perhitungan dengan perangkat lunak

Dari hasil uji kesamaan rata-rata, dapat diketahui bahwa P_{value} untuk KRP adalah 0,0000. Nilai P_{value} yang lebih kecil dari $\alpha = 0,05$ membuat hipotesis



awal (H_0) ditolak. Maka dapat disimpulkan bahwa secara statistik, nilai rata-rata KRP dengan menggunakan kombinasi awal adalah lebih besar dibandingkan dengan nilai rata-rata KRP dengan menggunakan kombinasi optimum.

Karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik dari respon tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* telah terpenuhi. Hal tersebut ditunjukkan dengan adanya penurunan nilai dari masing-masing respon secara individu setelah dilakukan optimasi. Besarnya penurunan nilai dari masing-masing respon tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* berturut-turut adalah sebesar 21,13%, 13,15% dan 78,06%. Perbandingan nilai masing-masing respon secara individu sebelum dan setelah dilakukan optimasi ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Perbandingan respon individu pada kondisi awal dan kondisi optimum

| Respon | Kombinasi awal | Kombinasi optimum | Keterangan | |
|--|----------------|-------------------|------------|-------|
| Tebal Lapisan Recast (μm) | 18,17 | 14,33 | 21,13% | Turun |
| Kekasaaran Permukaan (μm) | 2,51 | 2,18 | 13,15% | Turun |
| <i>Microcracks</i> ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$) | 0,02065 | 0,00453 | 78,06% | Turun |

Sumber: Hasil Perhitungan



4.5 Pengaruh parameter proses terhadap parameter respon

Pengaruh dari parameter-parameter proses yang meliputi AN, ON, OFF, OV dan SV terhadap respon tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* dapat diketahui dengan

membandingkan data yang diperoleh dari eksperimen yang telah dilakukan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pengaruh parameter-parameter proses WEDM tidak hanya berpengaruh pada tebal lapisan *recast* dan kekerasan permukaan benda kerja saja, tetapi juga mempengaruhi *microcrack* pada benda kerja. Pembahasan lebih dalam mengenai pengaruh dari parameter-parameter proses AN, ON, OFF, OV dan SV terhadap multi-respon tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* secara individu adalah sebagai berikut:

4.5.1 Parameter proses AN

Parameter proses AN adalah parameter proses yang mengatur besarnya arus tambahan pada proses pemotongan WEDM. Nilai AN yang lebih besar akan menghasilkan energi yang digunakan untuk mengikis benda kerja menjadi lebih besar. Hal ini akan membuat waktu proses pemotongan menjadi lebih singkat. Energi yang lebih besar akan menyebabkan panas terkonduksi lebih dalam. Lapisan HAZ yang terbentuk menjadi lebih tebal sehingga lapisan *recast* yang terbentuk juga akan semakin tebal. Selain itu, benda kerja yang terkikis akan semakin banyak dan kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja juga akan semakin dalam. Hal ini akan menyebabkan lebar pemotongan menjadi lebih besar dan kekasaran permukaan menjadi lebih tinggi.

4.5.2 Parameter proses ON

Proses pemotongan pada proses pemesinan WEDM hanya terjadi pada saat ON, nilai ON yang lebih besar akan mengakibatkan terjadinya waktu peloncatan bunga api listrik yang semakin panjang. Hal ini akan menyebabkan semakin banyaknya benda kerja yang terkikis dalam setiap satuan waktu, sehingga waktu pemotongan benda kerja menjadi semakin singkat.

Semakin besar nilai ON, maka energi yang dihasilkan juga akan semakin besar. Energi yang besar akan membuat benda kerja terkikis semakin banyak sehingga lebar pemotongan yang terjadi juga akan



semakin besar. Energi yang lebih besar juga akan menyebabkan panas terkonduksi lebih dalam. Lapisan HAZ yang terbentuk menjadi lebih tebal sehingga lapisan *recast* yang terbentuk juga akan semakin tebal. Selain itu, energi yang lebih besar akan membuat kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja semakin dalam, sehingga kekasaran permukaan yang dihasilkan juga semakin tinggi.

4.5.3 Parameter proses OV

Pada proses pemotongan WEDM benda kerja dan kawat elektroda tidak saling bersentuhan dan dipisahkan oleh cairan dielektrik. Loncatan bunga api listrik akan terjadi ketika beda potensial cukup untuk mengionisasi cairan dielektrik. Beda potensial tersebut sangat menentukan besarnya energi loncatan bunga api listrik dan ditentukan oleh nilai OV yang diberikan.

Semakin besar nilai OV, maka semakin besar pula beda potensial yang terjadi. Dengan demikian, energi yang digunakan untuk mengikis benda kerja akan semakin besar. Hal ini juga akan membuat waktu proses pemotongan menjadi semakin singkat. Selain itu, benda kerja yang terkikis semakin banyak dan kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja juga akan semakin dalam. Sebagai akibatnya lebar pemotongan menjadi lebih besar dan kekasaran permukaan menjadi lebih tinggi.

4.5.4 Parameter proses OFF

Parameter OFF merupakan lamanya waktu proses pemotongan berhenti pada proses pemesinan WEDM. Nilai OFF yang lebih lama akan mengakibatkan penurunan temperatur yang lebih besar sehingga energi yang diterima benda kerja semakin kecil. Penurunan temperatur tersebut akan mengakibatkan lapisan HAZ yang terbentuk menjadi lebih tipis sehingga lapisan *recast* yang terbentuk akan semakin tipis. Selain itu, energi yang lebih kecil akan membuat kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja semakin dangkal, sehingga kekasaran permukaan yang dihasilkan juga semakin kecil.

4.5.5 Parameter proses SV

Parameter SV digunakan untuk menentukan seberapa cepat respon pemakanan untuk mengubah kondisi pemotongan. Semakin kecil SV maka semakin cepat proses pemotongan, tetapi gap

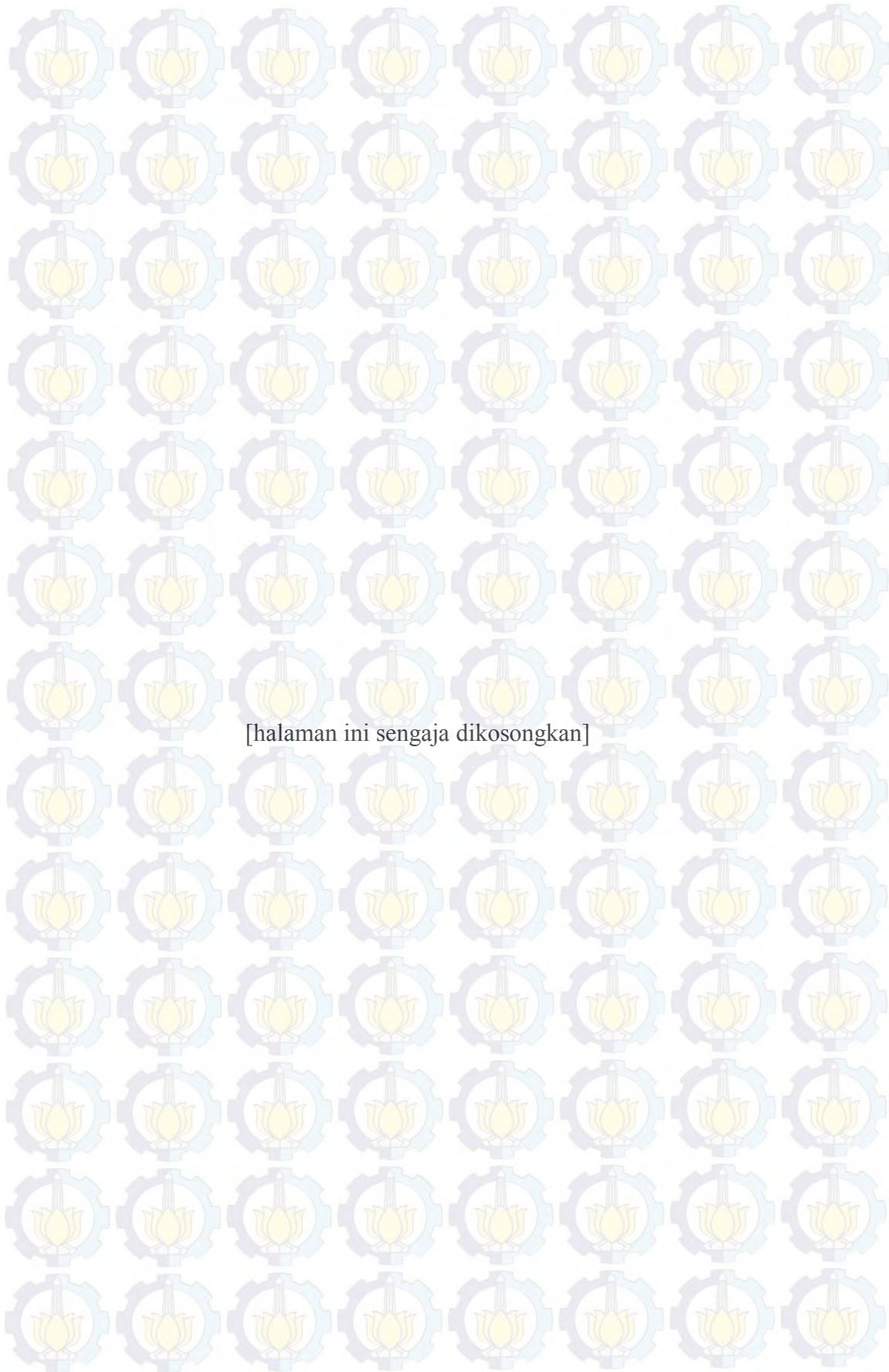


akan semakin kecil dan akan menyebabkan kawat putus. Dengan kata lain SV berfungsi untuk menjaga seberapa besar gap agar tidak terjadi kawat putus.

Pengikisan benda kerja selama proses pemotongan membuat jarak antar benda dan elektroda menjadi lebar. Hal ini tentu saja akan membuat beda potensial antar benda kerja dan kawat elektroda menjadi lebih kecil. Untuk mengatasi hal tersebut, jarak antar benda kerja dan kawat elektroda dapat diatur dengan menentukan besar tegangan referensi. Besar tegangan referensi tersebut diatur dengan melakukan pengaturan nilai SV. Dengan nilai SV yang kecil, maka *servo control* akan berusaha untuk memperoleh beda potensial yang sesuai dengan tegangan referensi pada jarak yang sempit. Sebagai akibatnya, kecepatan pemotongan akan meningkat sehingga waktu yang dibutuhkan akan semakin singkat. Selain itu, lebar pemotongan akan semakin sempit dan kekasaran permukaan yang dihasilkan juga akan semakin kecil.

4.6 Pengaruh faktor *noise* terhadap multi respon

Data penelitian ini diperoleh dengan dua kali replikasi pada proses pemotongan baja perkakas SKD 61 dengan menggunakan proses pemesinan WEDM, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Tabel L.11 menunjukkan data tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* dari respon hasil eksperimen, hasil pelatihan BPNN dan *error* (selisih hasil eksperimen dengan hasil BPNN). Perhitungan nilai eror rata-rata pada respon lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* secara berurutan adalah sebesar 0,26%, 0,24% dan 14,8%. Nilai eror yang besar tersebut dimungkinkan terdapat parameter-parameter lain yang memiliki pengaruh terhadap respon yang diamati. Parameter-parameter tersebut biasa dikenal sebagai faktor *noise*, yaitu parameter-parameter yang sulit atau bahkan tidak bisa dikendalikan. Contoh dari faktor-faktor *noise* pada WEDM antara lain seperti kemurnian dari cairan dielektrik, temperatur cairan dielektrik dan tekanan *flushing*.



[halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan proses optimasi yang telah dilakukan pada penelitian yang berjudul “optimasi tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* pada proses pemesinan *wire electrical discharge machining* (WEDM) baja perkakas SKD61 dengan menggunakan metode *back-propagation neural network* (BPNN) dan *genetic algoritrm* (GA)” ini, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Model peramalan dengan BPNN yang dikembangkan memiliki arsitektur jaringan 5-8-8-3, yang terdiri dari 5 *input layer*, 2 *hidden layer* dengan 8 *neuron* pada masing-masing *hidden layer*, dan 3 *output layer*. Fungsi aktivasinya adalah *tansig* dan fungsi pelatihan adalah *trainrp*.
2. Optimasi GA menghasilkan kombinasi parameter-parameter yang dapat meminimalkan tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* secara serentak pada seting parameter-parameter proses *arc on time* sebesar 2 μ s, *on time* sebesar 0,3 μ s, *open voltage* sebesar 90 volt, *off time* sebesar 10 μ s, dan *servo voltage* sebesar 40 volt.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Faktor-faktor *noise* selama proses permesinan WEDM perlu diperhatikan untuk mengurangi besarnya *error*.
2. Metode optimasi multirespon dalam penelitian ini menggunakan BPNN dan GA. Pada penelitian selanjutnya, dapat dilakukan sebuah studi untuk melakukan optimasi multirespon dengan menggunakan metode-metode optimasi yang lain sebagai perbandingan.



DAFTAR PUSTAKA

- Andres, E., Marco, S.F., Jorge, S.A., Manuel, O., hector, P., Martin, C., Rosarion, B., dan Rico (2011), "Comparison of PSO and DE for Training Neural Network," IEEE, vol 11, pp 83-87.
- Ahmad, F., Isa, N.A.M., Osman, M.K., dan Hussain, Z., (2010), "Performance Comparison of Gradient Descent and Genetic Algorithm Based Artificial Neural Network Training," IEEE, vol 10, pp 604-609.
- Ayu, M., (2006), "Performance Evaluation of Wire Electro-Discharge Machining on Tungsten Carbide," *Master Thesis* yang tidak dipublikasikan, Universiti Teknologi Malaysia, Johor.
- Bagiasna, K., (1979), *Proses-proses Nonkonvensional*, Departemen Teknik Mesin ITB, Bandung.
- Basuki, A., (2003), *Strategi Menggunakan Algoritma Genetika*, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya.
- Chee, Z.G., Chiang, T.A., dan Chie, Z.H., (2011) , "Feed Forward Neural Network : A Comparison Between Genetic Algorithm and Backpropagation Learning Algorithm," *ICIC International*, vol 7, pp 5839-5850, ISSN:1349-4198.
- Cheng, X., Wang, D., Xie, K., dan Zhang, J., (2009), "PSO Algorithm Combined with Neural Network Training Study," IEEE, vol 9.
- Fais, A.H., Ridok, A., dan Dewi, C., (2006), *Peramalan Time Series Saham Menggunakan Backpropagation Neural Network Berbasis Algoritma Genetika*, Universitas Brawijaya, Malang.
- Guitrau, E. B., (1997), *The EDM Handbook*, Hanser Gardner Publications, Cincinnati.
- Juhana, O. dan Suratman, M., (2000), *Menggambar Teknik Mesin dengan Standar ISO*, Pustaka Grafika, Bandung.
- Lee, H. T. dan Tai, T. Y., (2003), "Relationship between EDM Parameters and Surface Crack Formation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, hal. 676-683.
- Kumar, A., dan Singh, D. K., (2012), "Strategic Optimization and Investigation Effect of Process Parameters on Performance of Wire Electric Discharge Machine," *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, Vol. 4, hal. 2766-2772.



- Montgomery, D. C., (1991), *Design and Analysis of Experiment*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Pandey, P.C. dan Shan, H.S., (1980), *Modern Machining Processes*, Tata McGraw Hill Publishing Company Limited, New Delhi.
- Park, S. H., (1996), *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, 1st edition, Chapman & Hall, London.
- Puspitaningrum, D., (2006), "Pengantar Jaringan Syaraf Tiruan," Yogyakarta: Andi.
- Rabiha, S.G., dan Santosa, S., (2013), "Prediksi Data Arus Lalu Lintas Jangka Pendek Menggunakan Optimasi Neural Network Berbasis Genetik Algorithm," *Jurnal Teknologi Informasi*, Vol. 9 No.2, ISSN 1414-9999.
- Pandey, P.C. dan Shan, H.S., (1985), *Modern Machining Process*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.
- Rao, P. S., Satyanarayana, B. M., dan Praveen, M. K., (2008), "Influence of Machining Parameters on Electric Discharge Machining of Maraging Steels—An Experimental Investigation," *Proceedings of The World Congress on Engineering 2008* Vol. II, hal. 978-988.
- Rochim, T., (2001), *Proses Pemesinan*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Rong, Y., Zang, Z., Zang, G., Yue, C., Gu, Y., dan Huang, Y., (2015), "Parameter Optimization of Laser Brazing in Crimping Butt using Taguchi and BPNN-GA," *Optic and Laser Engineering*, Vol. 67, pp. 94-104.
- Ross, P.J., (2008), *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, 7th edition, McGraw-Hill International Editions.
- Siang, J.J., (2005), "Jaringan Syaraf Tiruan dan Pemrogramannya menggunakan Matlab," Yogyakarta: Andi.
- Satyanarayana, B., Rao, P. S., dan Praveen, M.K., (2008), "Effect of WEDM Conditions on Surface Roughness: A Parametric Optimisation Using Taguchi Method," *International Journal of Advanced Engineering Science and Technologies*, Vol.6, No. 1, hal.041-048.
- Shandilya, P., dan Jain, P.K., (2012), "Genetic Algorithm Based Optimization During Wire Electric Discharge Machining of Metal Matrix Composite," *Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium*, Volume 23, No.1, ISSN 2304-1382.
- Soejanto, I., (2009), *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta.



Sommer, C. dan Sommer, S., (2005), *Complete EDM Handbook*, Advanced Publishing Inc., Houston.

Subekti, M., (1999), "Pengembangan Perangkat Lunak Berbasis Kecerdasan Buatan untuk Analisis Kondisi Ginjal Pasien," *Proceeding Lokakarya Komputasi dan Sains Nuklir X*, BATAN.

Suhardjono, (2004), "Pengaruh *Arc On* dan *Arc Off Time* terhadap Kekasaran Permukaan dan Laju Pembuangan Geram Hasil Pemesinan *Sinking EDM*," *Jurnal Teknik Mesin*, vol 6, no.1.

Suyanto, (2008), "Evolutionary Computation," Bandung: Informatika.

Susanti, A.P., dan Aisjah, S., (2013), "Perancangan Sistem Prediktor Daya Pada Panel Photovoltaic di Bouy Weather Station," *Jurnal Teknik POMITS*, Vol. 2, No. 2, ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print).

Ugrasen, G., Ravindra, H.V., Neveen, G.V. dan Keshavamurthy, R., (2014), "Process optimization and estimation of machining performances using artificial neural network in wire EDM," *Proceedings of the third International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC 2014)*, hal. 1752-1760.

Yeh, S.H., Chiu, L.H., Chuang, T.L., dan Wu, C.Y., (2013), "Thermal Fatigue Behavior Evaluation of Shot-Peened JIS SKD61 Hot-Work Mold Steel," *Materials Transactions*, Vol. 54, No. 6, pp. 1053-1056.

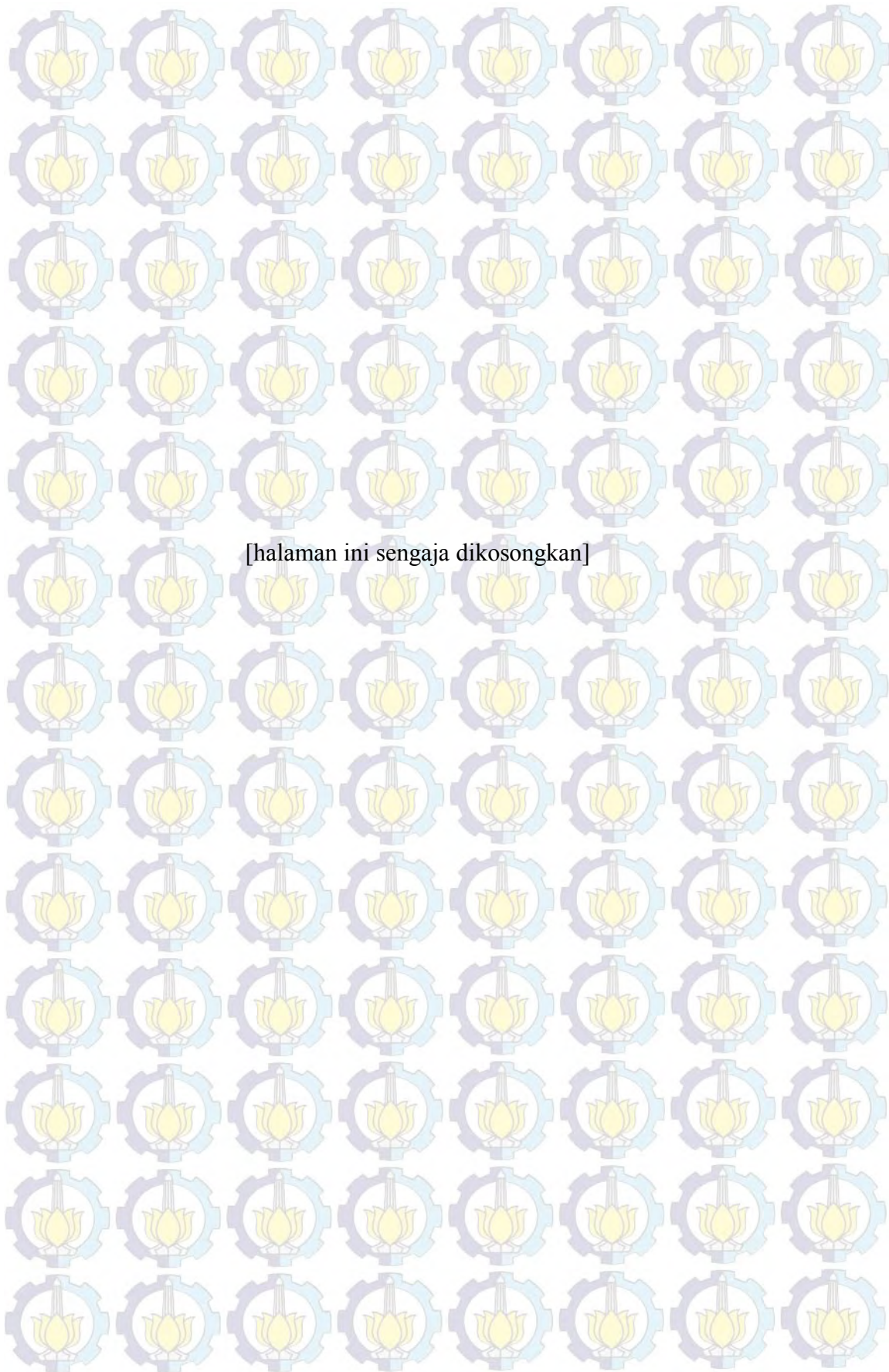
Zhao, F., Ren, Z., dan Yu, D., (2005), "Application of an Improvement Particle Swarm Optimization Algorithm for Neural Network," *IEEE*, pp 1693-1698.

Zhang, N., dan Bahera, P.K., (2013), "Solar Radiation Based on Particle Swarm Optimization and Evolutionary Using Recurrent and Neural Network," *IEEE*, vol 13.

., (2006), *Instruction Manual Book Wirecut CHMER CW32GF*, Ching Hung Machinery and Electric Industrial Co., Ltd.

., (2015), *Global Optimization Toolbox User's Guide*, The MathWorks, Inc., Natick, MA.

http://www.en.wikipedia.or/wiki/surface_finish.



Lampiran A

Tabel L.1 Spesifikasi mesin WEDM

| Item | Spesification |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Table travel (X and Y axis) | 350 mm x 250 mm (13.7" x 9.8") |
| Z axis Travel | 220 mm (6.6 ") |
| Auxiliary travel (u and V axis) | 80 mm x 80 mm (3.1"x 3.1") |
| Work table size (W x D) | 600 mm x 400 mm (23.6"x 15.7") |
| Work tank dimensions (W x D) | 895 mm x 650 mm (35.2"x 25.5") |
| Maximum height of work piece | 220 mm (8.6 ") submerge |
| Maximum weight of work piece | 450 kg (990 lb) submerge |
| Distance from floor to table top | 965 mm (38") |
| Taper angle | 20°/80 mm (3.1") |
| Wire tension | 300 g to 2300 g (0.66 lb to 5.06 lb) |
| Wire speed feed (max) | 250 mm/sec (9.8 in/sec) |
| Wire diamter | 0.15 to 0.30 mm (0.006 to 0.012 in) |
| Wire pool volume (max) | 6 kg (13.2 lb) |
| Machine tool dimension (W x D x H) | 1650 mm x 1900 mm x 2040 mm |
| Machine tool dimension (W x D) | 2250 mm x 2200 mm (88.56" x 86.6 ") |
| Machine tool weight | 2800 kg |

Sumber: *Instruction Manual Book Wire cut EDM CHMER CW32GF*

Tabel L.2 Dielektrik tank

| Item | Spesification |
|----------------------------------|----------------------------|
| External dimensions (W x D x H) | 550 mm x 2200 mm x 1770 mm |
| Weight (empty) | 230 kg (506 lb) |
| Capacity | 5301 (138 gal) |
| Deionizer | 10 l (2.6 gal) |
| Filtering system | 2 replaceable paper filter |

Sumber: *Instruction Manual Book Wire cut EDM CHMER CW32GF*

Lampiran B

Tabel L.3 Seting parameter pada mesin WEDM CHMER CW32GF

| Simbol | Nama faktor | Interval seting |
|--------|--------------------------|-----------------------------------|
| OV | <i>Open voltage</i> | 0 ~ 15 (70 V ~ 145 V) |
| | | 0 = 70 V ; 10 = 120 V |
| | | 1 = 75 V ; 11 = 125 V |
| | | 2 = 80 V ; 12 = 130 V |
| | | 3 = 85 V ; 13 = 135 V |
| | | 4 = 90 V ; 14 = 140 V |
| | | 5 = 95 V ; 15 = 145 V |
| | | 6 = 100 V |
| | | 7 = 105V |
| | | 8 = 110 V |
| LP | <i>Low Power</i> | 9 = 115 V |
| | | 0 ~ 30 |
| | | LP = 0 DC rough cutting |
| | | LP = 1 DC spark alignment |
| | | LP = 2 DC fine cutting |
| | | LP = 20 DC moderate cutting |
| | | LP = 3 ~ 9 not available |
| | | LP = 10 AC rough cutting |
| | | LP = 11 AC spark alignment |
| | | LP = 12 AC fine cutting |
| ON | <i>On Time</i> | LP = 30 AC moderate cutting |
| | | LP = 13 ~ 29 Super finish cutting |
| | | 1 ~ 10 |
| | | 1 = 0.1 |
| | | 2 = 0.2 μ s |
| | | 3 = 0.3 μ s |
| | | 4 = 0.4 μ s |
| | | 5 = 0.5 μ s |
| | | 6 = 0.6 μ s |
| | | 7 = 0.7 μ s |
| OFF | <i>Off time</i> | 8 = 0.8 μ s |
| | | 9 = 0.9 μ s |
| AN | <i>Arc On time</i> | 10 = 1 μ s |
| | | 7 ~ 50 |
| AFF | <i>Arc Of time</i> | 7 = 7 μ s...50 = 50 μ s |
| SV | <i>Servo Voltage</i> | 1 ~ 7 |
| FR | <i>Feedrate override</i> | 3 ~ 50 |
| WF | <i>Wire feed</i> | 10V ~ 75V |
| | | 0 ~ 50 |
| | | 0 ~ 15 (70 V ~ 145 V) |
| | | 0 = 0 mm/sec ; 10 = 120 mm/sec |
| | | 1 = 0 mm/sec ; 11 = 125 mm/sec |
| | | 2 = 5 mm/sec ; 12 = 130 mm/sec |
| | | 3 = 25 mm/sec ; 13 = 135 mm/sec |
| | | 4 = 60 mm/sec ; 14 = 140 mm/sec |
| | | 5 = 90 V ; 15 = 145 mm/sec |
| | | 6 = 100 V |
| WL | <i>Water flow</i> | 7 = 105V |
| FM | <i>Feedrate mode</i> | 8 = 110 V |
| F | <i>Feedrate</i> | 9 = 115 V |
| | | 0 ~ 7 |
| | | 0 ~ 1 |
| | | 0 ~ 500 |

Sumber: Instruction Manual Book Wire cut EDM CHMER CW32GF

Lampiran C

Tabel L.4 ISO Certification steel bar JIS SKD61

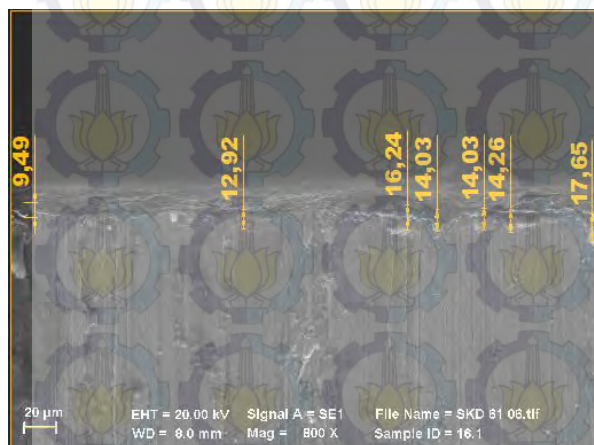
| | |
|--|--|
| General Information | Very good retentively of hardness and toughness at elevated temperatures. Compression strength is very good and it is insensitive to thermal shocks. Wear resistance is better than 2343. Good mechanical property in the annealed condition |
| Sizes | Diameter: 10-600mm Length: 2000-5800mm |
| Comparable Standards | AISI/SAE : H13 DIN : X40CrMoV51 JIS : SKD61 BS : BH13 |
| Chemical Analysis (%) | C : 0.37-0.42 Mn : 0.30-0.50 Si : 0.90-1.20 Cr : 4.80-5.50 V : 0.90-1.10 Mo : 1.20-1.50 P : ≤0.03 S : ≤0.03 |
| Heat treatment (Isothermal annealing) | Heat to 880°C, hold at temperature for 1/2 h to 1 h; Furnace cooling to 780°C and hold at temperature for at least 5 hours; Cool by 10°C/h to 750°C; Cooling in air. |
| Maximum hardness | 230 HB |
| Stress relieving | To be carried out after machining and before the final heat treatment. Heat to 650÷700°C, hold for 4÷6 hours; Furnace cooling to 300÷350°C. Cooling in air. |
| Hardening | Initial preheating to 350÷450°C; Second preheating to 750÷850°C; Heat to hardening temperature in the range 1000÷1050°C and hold at temperature. Cooling in air. Quenched hardness: 52÷56 HRC |
| Tempering | In the range 550-630°C for at least 3 hours according to hardness requirements. Tempering must be repeated a second time at a temperature to or 20°C lower than the previous. Before tempering, preheat the parts to 200÷300°C. |
| Specialty | High penetration, high rigidity, high endurance, small distortion when quench, possess high rigidity of Cr12*210CrW12, good tenacity, adapt to tool mould of complicated form. |

Lampiran D

Tabel L.5 Hasil pengukuran tebal lapisan *recast* replikasi 1

| REPLIKASI 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------|--------|----|----|-----|----|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Eksperimen ke | kombinasi faktor ke- | faktor | | | | | Recast Layer (μm) | | | | | | | | | | | | | |
| | | AN | ON | OV | OFF | SV | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 16 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 | 32 | 9,49 | 12,92 | 16,24 | 14,03 | 14,03 | 14,28 | 17,65 | 14,92 | 13,95 | 15,09 | 13,98 | 13,14 | 13,04 | 16,71 |
| 18 | 2 | 2 | 3 | 6 | 9 | 36 | 17,9 | 21,03 | 18,79 | 18,04 | 17,27 | 19,24 | 22,37 | 18,34 | 19,68 | 19,69 | 23,55 | 17,25 | 17,35 | 21,03 |
| 7 | 3 | 2 | 3 | 8 | 10 | 40 | 15,61 | 14,97 | 16,01 | 15,87 | 20,41 | 18,59 | 18,31 | 18,21 | 15,57 | 16,67 | 15,79 | 18,28 | 19,84 | 15,8 |
| 5 | 4 | 2 | 4 | 4 | 8 | 36 | 17,66 | 15,48 | 14,56 | 17,11 | 18,94 | 16,83 | 16,13 | 16,4 | 15,86 | 19,21 | 19,97 | 20,68 | 17,93 | 14,35 |
| 10 | 5 | 2 | 4 | 6 | 9 | 40 | 16,69 | 15,16 | 14,67 | 13,13 | 15,82 | 16,11 | 13,72 | 18,83 | 18,56 | 22,06 | 20,12 | 19,66 | 23,17 | 18,52 |
| 11 | 6 | 2 | 4 | 8 | 10 | 32 | 13,74 | 15,58 | 16,06 | 16,69 | 13,89 | 14,44 | 13,72 | 14,41 | 14,72 | 15,88 | 15,19 | 14,25 | 14,66 | 17,51 |
| 3 | 7 | 2 | 5 | 4 | 9 | 32 | 19,75 | 17,77 | 18,77 | 18,03 | 19,03 | 16,39 | 17,56 | 20,11 | 21,43 | 18,45 | 20,63 | 17,13 | 16,25 | 18,99 |
| 9 | 8 | 2 | 5 | 6 | 10 | 36 | 17,34 | 15,82 | 17,46 | 22,12 | 20,4 | 20,88 | 22,83 | 16,05 | 24,54 | 17,09 | 16,54 | 18,6 | 21,59 | 14,68 |
| 1 | 9 | 2 | 5 | 8 | 8 | 40 | 18,86 | 18,49 | 18,09 | 19,12 | 19,9 | 20,41 | 20,41 | 21,33 | 19,97 | 18,15 | 19,97 | 23,14 | 18,61 | 25,41 |
| 2 | 10 | 3 | 3 | 4 | 10 | 40 | 21,86 | 15,03 | 15,56 | 17,21 | 20,97 | 24,93 | 16,1 | 20,24 | 17,54 | 17,87 | 18,42 | 15,78 | 16,66 | 16,89 |
| 14 | 11 | 3 | 3 | 6 | 8 | 32 | 16,02 | 14,7 | 14,59 | 19,8 | 22,42 | 13,84 | 13,01 | 16,28 | 15,81 | 16,06 | 19,68 | 21,65 | 15,48 | 15,73 |
| 17 | 12 | 3 | 3 | 8 | 9 | 36 | 20,32 | 18,15 | 18,15 | 15,51 | 19,42 | 22,74 | 18,5 | 18,2 | 20,23 | 20,23 | 19,01 | 19,82 | 19,42 | 19,82 |
| 15 | 13 | 3 | 4 | 4 | 9 | 40 | 19,41 | 17,56 | 19,62 | 20,9 | 20,69 | 20,7 | 18,13 | 17,81 | 15,99 | 23,66 | 19,28 | 20,92 | 23,85 | 21,36 |
| 12 | 14 | 3 | 4 | 6 | 10 | 32 | 17,97 | 16,31 | 16,98 | 18,84 | 19,18 | 16,44 | 16,17 | 14,41 | 17,78 | 16,24 | 14,21 | 13,07 | 13,25 | 15,43 |
| 8 | 15 | 3 | 4 | 8 | 8 | 36 | 18,17 | 18,6 | 17,38 | 17,57 | 18,65 | 19,06 | 17,79 | 19,37 | 17,59 | 19,75 | 18,61 | 23,27 | 21,06 | 19,16 |
| 13 | 16 | 3 | 5 | 4 | 10 | 36 | 15,8 | 22,51 | 19,97 | 18,15 | 18,29 | 23,24 | 18,15 | 19,78 | 16,88 | 18,27 | 18,02 | 21,19 | 19,08 | 21,19 |
| 6 | 17 | 3 | 5 | 6 | 8 | 40 | 21,75 | 19,72 | 25,94 | 27,35 | 21,27 | 23,08 | 24,1 | 19,89 | 20,61 | 19,58 | 23,27 | 23,79 | 19,62 | 23,18 |
| 4 | 18 | 3 | 5 | 8 | 9 | 32 | 17,85 | 20,53 | 17,56 | 23,16 | 19,74 | 15,34 | 19,19 | 16,14 | 18,96 | 22,28 | 19,84 | 23,84 | 25,96 | 18,57 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Mean RL |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 14,2479 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 19,395 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 17,1379 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 17,2221 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 17,5871 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 15,0529 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18,5921 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18,9957 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 20,1329 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18,2186 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 16,7907 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 19,7744 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 19,9914 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 16,1629 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 19,0021 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 19,3229 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 22,3679 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 19,9257 |

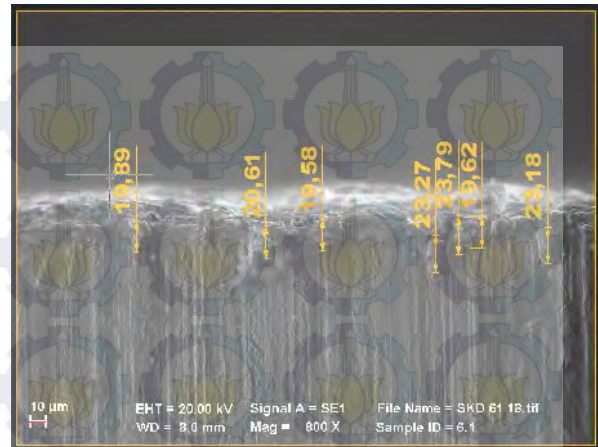
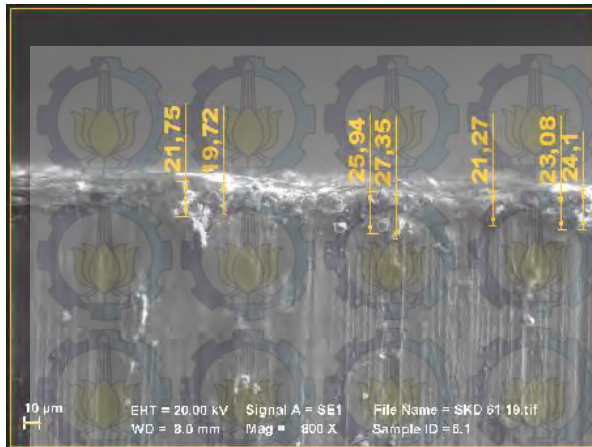
Sumber: Hasil perhitungan



(a) pada kombinasi faktor ke 1



(b) pada kombinasi faktor ke 1

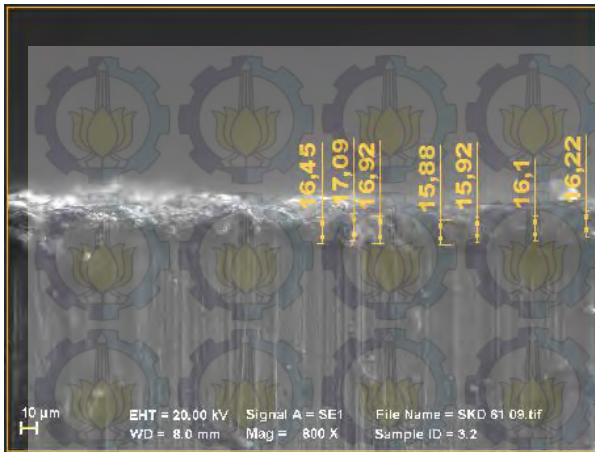


(c) pada kombinasi faktor ke 17 (d) pada kombinasi faktor ke 17
Gambar L.1 Lapisan *recast* replikasi ke 1(a) dan (b) pada kombinasi faktor ke 1, (c) dan (d) pada kombinasi faktor ke 17

Tabel L.6 Hasil pengukuran tebal lapisan *recast* replikasi 2

| REPLIKASI 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------|--------|----|----|-----|----|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Eksperimen ke | kombinasi faktor ke- | faktor | | | | | Recast Layer (μm) | | | | | | | | | | | | | |
| | | AN | ON | OV | OFF | SV | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 | 32 | 16,45 | 17,09 | 16,92 | 15,88 | 15,92 | 16,1 | 16,22 | 15,62 | 15,47 | 16,72 | 15,52 | 15,05 | 12,04 | 15,73 |
| 8 | 2 | 2 | 3 | 6 | 9 | 36 | 19,32 | 19,43 | 21,13 | 17,74 | 19,66 | 18,96 | 17,99 | 18,32 | 20,51 | 24,43 | 19,83 | 19,76 | 18,02 | 17,09 |
| 10 | 3 | 2 | 3 | 8 | 10 | 40 | 18,06 | 19,07 | 19,07 | 18,53 | 17,34 | 17,01 | 16,76 | 16,43 | 20,07 | 15,41 | 16,53 | 15,89 | 14,43 | 19,67 |
| 15 | 4 | 2 | 4 | 4 | 8 | 36 | 16,77 | 16,47 | 15,96 | 16,62 | 15,1 | 16,55 | 15,99 | 16,79 | 17,06 | 17,08 | 19,78 | 17,06 | 19,9 | 17,29 |
| 7 | 5 | 2 | 4 | 6 | 9 | 40 | 18,54 | 18,47 | 18,2 | 22,32 | 20,26 | 18,5 | 20,85 | 19,54 | 19,5 | 18,32 | 18,12 | 18,29 | 19,75 | 19,47 |
| 5 | 6 | 2 | 4 | 8 | 10 | 32 | 15,04 | 14,18 | 14,06 | 16,08 | 15,47 | 18,08 | 20,49 | 18,54 | 16,65 | 14,59 | 16,27 | 20,2 | 15,14 | 16,27 |
| 16 | 7 | 2 | 5 | 4 | 9 | 32 | 20,92 | 18,52 | 17,78 | 18,06 | 25,72 | 18,86 | 16,97 | 15,48 | 19,45 | 19,46 | 22,36 | 17,3 | 14,78 | 16,26 |
| 18 | 8 | 2 | 5 | 6 | 10 | 36 | 16,6 | 17,64 | 16,08 | 17,29 | 23,89 | 14,56 | 22,39 | 17,87 | 17,11 | 18,12 | 20,13 | 19,76 | 20,39 | 20,45 |
| 13 | 9 | 2 | 5 | 8 | 8 | 40 | 20,84 | 19,82 | 20,33 | 23,64 | 22,11 | 20,59 | 20,74 | 17,64 | 18,9 | 17,25 | 17,26 | 22,7 | 20,44 | 18,83 |
| 17 | 10 | 3 | 3 | 4 | 10 | 40 | 24,62 | 20,96 | 16,19 | 15,65 | 17,01 | 15,88 | 17,86 | 14,31 | 17,59 | 13,24 | 11,41 | 18,44 | 16,63 | 18,55 |
| 2 | 11 | 3 | 3 | 6 | 8 | 32 | 15,4 | 16,02 | 16,29 | 16,15 | 15,36 | 15,71 | 13,78 | 15,27 | 16,56 | 18,07 | 16,28 | 16,44 | 19,84 | 17,86 |
| 6 | 12 | 3 | 3 | 8 | 9 | 36 | 16,63 | 17,1 | 21,61 | 16,25 | 19,12 | 19,38 | 21,78 | 16,95 | 19,57 | 19,5 | 18,08 | 18,9 | 19,18 | 18,97 |
| 4 | 13 | 3 | 4 | 4 | 9 | 40 | 18,58 | 18,79 | 20,68 | 20,91 | 22,38 | 23,3 | 21,29 | 19,58 | 18,96 | 22,22 | 21,09 | 23,72 | 15,64 | 19,96 |
| 9 | 14 | 3 | 4 | 6 | 10 | 32 | 18,89 | 16,62 | 16,62 | 17,73 | 16,24 | 17,38 | 15,43 | 14,02 | 17,94 | 19,22 | 16,34 | 15,37 | 16,98 | 14,41 |
| 14 | 15 | 3 | 4 | 8 | 8 | 36 | 16,83 | 16,74 | 16,69 | 13,83 | 18,32 | 17,73 | 17,3 | 22,51 | 19,27 | 19,65 | 19,66 | 20,92 | 16,95 | 22,57 |
| 1 | 16 | 3 | 5 | 4 | 10 | 36 | 25,34 | 18,64 | 16,84 | 19,31 | 20,04 | 20,77 | 16,36 | 20,22 | 18,54 | 21,91 | 19,8 | 20,64 | 18,11 | 17,69 |
| 12 | 17 | 3 | 5 | 6 | 8 | 40 | 21,87 | 23,72 | 23,17 | 20,98 | 21,36 | 23,78 | 21,2 | 21,04 | 22,47 | 22,06 | 17,93 | 20,05 | 22,96 | 24,31 |
| 11 | 18 | 3 | 5 | 8 | 9 | 32 | 19,55 | 25,76 | 19,9 | 24,89 | 22,71 | 19,55 | 18,88 | 16,9 | 17,43 | 19,39 | 20,22 | 20,91 | 21,95 | 17,51 |
| | | | | | | | Mean RL | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 15,7664 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 19,4421 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 17,4479 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 17,03 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 19,295 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 16,5043 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 18,7086 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 18,7343 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 20,0779 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 17,0243 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 16,3593 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 18,7871 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 20,5071 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 16,6564 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 18,4979 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 19,5864 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 21,9214 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 20,3964 | | | | | | | | | | | | | |

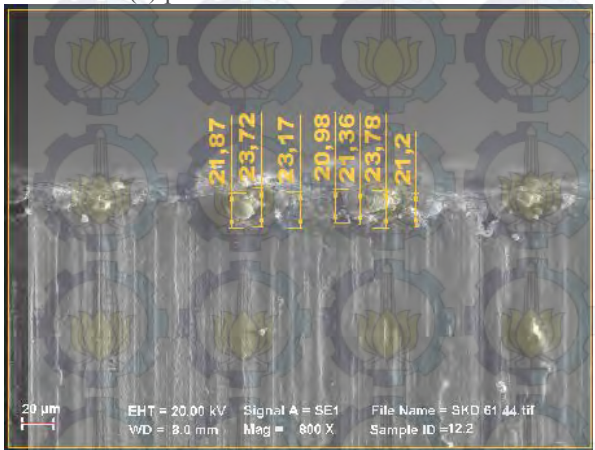
Sumber: Hasil perhitungan



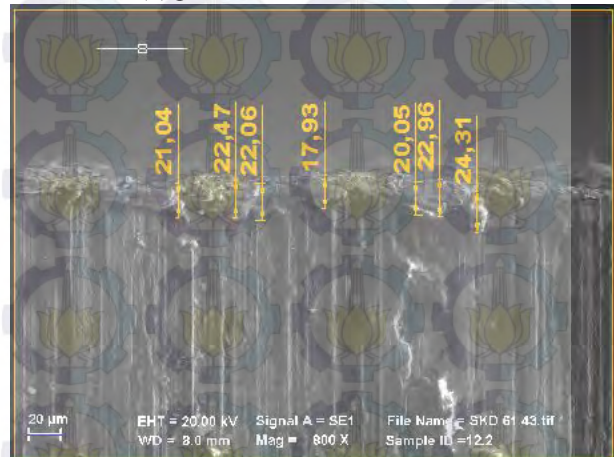
(a) pada kombinasi faktor ke 1



(b) pada kombinasi faktor ke 1



(c) pada kombinasi faktor ke 17



(d) pada kombinasi faktor ke 17

Gambar L.2 Lapisan *recast* replikasi ke 2: (a) dan (b) pada kombinasi faktor ke 1, (c) dan (d) pada kombinasi faktor ke 17

Lampiran E

Tabel L.7 Hasil pengukuran kekasaran permukaan benda kerja replikasi 1

| REPLIKASI 1 | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------|--------|----|----|-----|----|----------------------|------|------|---------|
| Eksperimen ke | Kombinasi faktor ke- | Faktor | | | | | SR (μm) | | | Mean SR |
| | | AN | ON | OV | OFF | SV | 1 | 2 | 3 | |
| 16 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 | 32 | 2,16 | 2,42 | 2,29 | 2,29 |
| 18 | 2 | 2 | 3 | 6 | 9 | 36 | 2,29 | 2,16 | 2,32 | 2,26 |
| 7 | 3 | 2 | 3 | 8 | 10 | 40 | 2,60 | 2,47 | 2,29 | 2,45 |
| 5 | 4 | 2 | 4 | 4 | 8 | 36 | 2,49 | 2,51 | 2,52 | 2,51 |
| 10 | 5 | 2 | 4 | 6 | 9 | 40 | 2,45 | 2,30 | 2,54 | 2,43 |
| 11 | 6 | 2 | 4 | 8 | 10 | 32 | 2,95 | 2,53 | 2,43 | 2,64 |
| 3 | 7 | 2 | 5 | 4 | 9 | 32 | 2,72 | 2,30 | 3,19 | 2,74 |
| 9 | 8 | 2 | 5 | 6 | 10 | 36 | 3,18 | 2,78 | 2,63 | 2,86 |
| 1 | 9 | 2 | 5 | 8 | 8 | 40 | 3,38 | 3,64 | 3,53 | 3,52 |
| 2 | 10 | 3 | 3 | 4 | 10 | 40 | 2,22 | 2,43 | 2,49 | 2,38 |
| 14 | 11 | 3 | 3 | 6 | 8 | 32 | 2,30 | 2,22 | 2,11 | 2,21 |
| 17 | 12 | 3 | 3 | 8 | 9 | 36 | 2,77 | 2,85 | 2,92 | 2,85 |
| 15 | 13 | 3 | 4 | 4 | 9 | 40 | 2,86 | 2,77 | 2,96 | 2,86 |
| 12 | 14 | 3 | 4 | 6 | 10 | 32 | 2,40 | 2,34 | 2,53 | 2,42 |
| 8 | 15 | 3 | 4 | 8 | 8 | 36 | 3,61 | 3,22 | 3,15 | 3,33 |
| 13 | 16 | 3 | 5 | 4 | 10 | 36 | 2,34 | 2,83 | 2,35 | 2,51 |
| 6 | 17 | 3 | 5 | 6 | 8 | 40 | 3,12 | 3,03 | 3,61 | 3,25 |
| 4 | 18 | 3 | 5 | 8 | 9 | 32 | 3,73 | 3,88 | 3,76 | 3,79 |

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel L.8 Hasil pengukuran kekasaran permukaan benda kerja replikasi 2

| REPLIKASI 2 | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------|--------|----|----|-----|----|----------------------|------|------|---------|
| Eksperimen ke | Kombinasi faktor ke- | Faktor | | | | | SR (μm) | | | Mean SR |
| | | AN | ON | OV | OFF | SV | 1 | 2 | 3 | |
| 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 | 32 | 2,51 | 2,02 | 2,16 | 2,23 |
| 8 | 2 | 2 | 3 | 6 | 9 | 36 | 2,12 | 2,19 | 2,38 | 2,23 |
| 10 | 3 | 2 | 3 | 8 | 10 | 40 | 3,48 | 2,33 | 2,68 | 2,83 |
| 15 | 4 | 2 | 4 | 4 | 8 | 36 | 2,68 | 2,54 | 2,11 | 2,44 |
| 7 | 5 | 2 | 4 | 6 | 9 | 40 | 2,84 | 2,73 | 2,60 | 2,72 |
| 5 | 6 | 2 | 4 | 8 | 10 | 32 | 2,77 | 2,86 | 2,79 | 2,81 |
| 16 | 7 | 2 | 5 | 4 | 9 | 32 | 2,02 | 2,27 | 2,32 | 2,20 |
| 18 | 8 | 2 | 5 | 6 | 10 | 36 | 2,89 | 2,98 | 2,94 | 2,94 |
| 13 | 9 | 2 | 5 | 8 | 8 | 40 | 3,74 | 3,65 | 3,63 | 3,67 |
| 17 | 10 | 3 | 3 | 4 | 10 | 40 | 2,43 | 2,64 | 2,61 | 2,56 |
| 2 | 11 | 3 | 3 | 6 | 8 | 32 | 2,33 | 2,32 | 2,25 | 2,30 |
| 6 | 12 | 3 | 3 | 8 | 9 | 36 | 2,85 | 2,96 | 2,92 | 2,91 |
| 4 | 13 | 3 | 4 | 4 | 9 | 40 | 2,32 | 2,43 | 2,53 | 2,43 |
| 9 | 14 | 3 | 4 | 6 | 10 | 32 | 2,78 | 2,84 | 2,71 | 2,78 |
| 14 | 15 | 3 | 4 | 8 | 8 | 36 | 3,09 | 3,48 | 3,26 | 3,28 |
| 1 | 16 | 3 | 5 | 4 | 10 | 36 | 2,73 | 2,85 | 2,92 | 2,83 |
| 12 | 17 | 3 | 5 | 6 | 8 | 40 | 3,79 | 3,72 | 3,21 | 3,57 |
| 11 | 18 | 3 | 5 | 8 | 9 | 32 | 3,76 | 3,41 | 3,52 | 3,56 |

Sumber: Hasil perhitungan

Lampiran F

Tabel L.9 Hasil pengukuran *microcracks* pada replikasi 1

| Kombinasi Faktor ke- | TPR (μm) | p (μm) | l (μm) | Luas Penampang yang diamati (μm^2) | KRP ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$) |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|--|--|
| 1 | 155,46 | 147,59 | 110,69 | 16336,74 | 0,0095 |
| 2 | 216,49 | 145,35 | 109,01 | 15844,60 | 0,0137 |
| 3 | 269,48 | 147,22 | 110,41 | 16254,56 | 0,0166 |
| 4 | 238,85 | 147,29 | 110,47 | 16271,13 | 0,0147 |
| 5 | 297,98 | 145,76 | 109,32 | 15934,48 | 0,0187 |
| 6 | 137,88 | 146,46 | 109,84 | 16087,17 | 0,0086 |
| 7 | 281,42 | 146,09 | 109,57 | 16007,08 | 0,0176 |
| 8 | 327,68 | 147,78 | 110,83 | 16378,46 | 0,0200 |
| 9 | 190,06 | 146,08 | 109,56 | 16004,52 | 0,0119 |
| 10 | 284,34 | 147,74 | 110,81 | 16371,07 | 0,0174 |
| 11 | 278,76 | 146,92 | 110,19 | 16189,11 | 0,0172 |
| 12 | 257,13 | 145,18 | 108,88 | 15807,20 | 0,0163 |
| 13 | 260,66 | 147,36 | 110,52 | 16286,23 | 0,0160 |
| 14 | 197,57 | 145,72 | 109,29 | 15925,74 | 0,0124 |
| 15 | 221,58 | 146,72 | 110,04 | 16145,07 | 0,0137 |
| 16 | 531,08 | 146,47 | 109,85 | 16089,73 | 0,0330 |
| 17 | 640,74 | 147,24 | 110,43 | 16259,71 | 0,0394 |
| 18 | 356,89 | 146,45 | 109,84 | 16086,07 | 0,0222 |

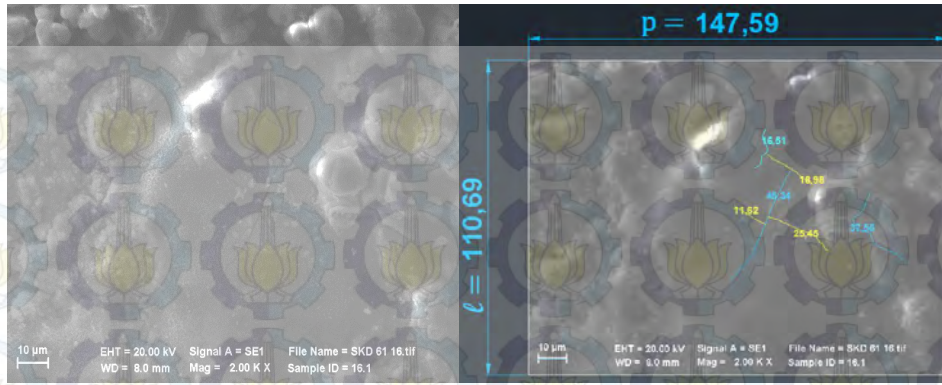
Sumber: Hasil perhitungan

Tabel L.10 Hasil pengukuran *microcracks* pada replikasi 2

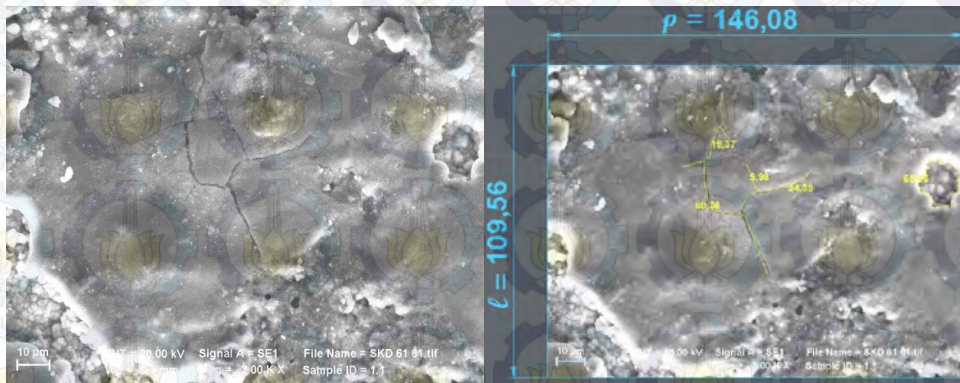
| Kombinasi Faktor ke- | TPR (μm) | p (μm) | l (μm) | Luas Penampang yang diamati (μm^2) | KRP ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$) |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|--|--|
| 1 | 105,45 | 145,92 | 109,44 | 15969,48 | 0,0066 |
| 2 | 237,53 | 146,41 | 109,81 | 16077,28 | 0,0148 |
| 3 | 167,96 | 147,3 | 110,47 | 16272,23 | 0,0103 |
| 4 | 240,02 | 146,22 | 109,67 | 16035,95 | 0,015 |
| 5 | 311,9 | 146,26 | 109,69 | 16043,26 | 0,0194 |
| 6 | 264,63 | 147,42 | 110,56 | 16298,76 | 0,0162 |
| 7 | 190,44 | 147,32 | 110,49 | 16277,39 | 0,0117 |
| 8 | 218,99 | 147,71 | 110,71 | 16352,97 | 0,0134 |
| 9 | 487,05 | 146,42 | 109,82 | 16079,84 | 0,0303 |
| 10 | 298,16 | 147,2 | 110,4 | 16250,88 | 0,0183 |
| 11 | 163,43 | 146,07 | 109,55 | 16001,97 | 0,0102 |
| 12 | 223,76 | 145,72 | 109,29 | 15925,74 | 0,0141 |
| 13 | 286,04 | 147,61 | 110,71 | 16341,9 | 0,0175 |
| 14 | 232,29 | 146,27 | 109,7 | 16045,82 | 0,0145 |
| 15 | 305,86 | 148,95 | 111,71 | 16639,2 | 0,0184 |
| 16 | 356,82 | 148,96 | 111,72 | 16641,81 | 0,0214 |
| 17 | 362,48 | 147,82 | 110,87 | 16388,8 | 0,0221 |
| 18 | 313,28 | 147,27 | 110,46 | 16267,44 | 0,0193 |

Sumber: Hasil perhitungan

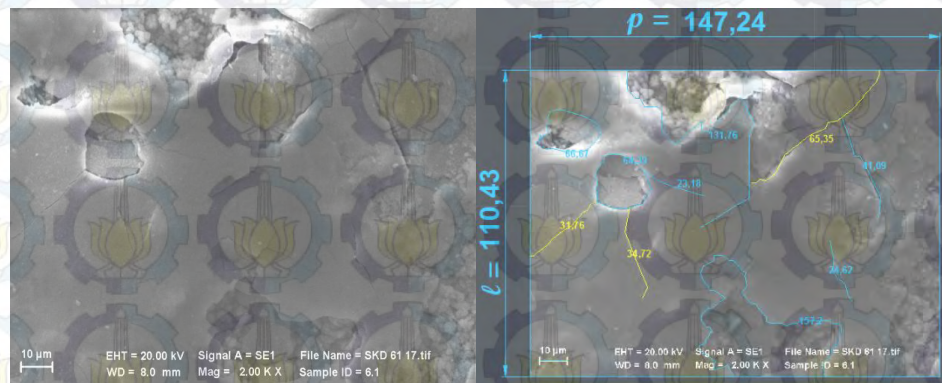
Contoh pengukuran *microcracks*:



(a) Kombinasi Faktor ke 1



(b) Kombinasi Faktor ke 9



(c) Kombinasi Faktor ke 17

Gambar L.3 Pengukuran *microcracks* pada (a) replikasi 1 dari kombinasi faktor ke 1, (b) replikasi 1 dari kombinasi faktor ke 9, dan (c) replikasi 1 dari kombinasi faktor ke 17

Perhitungan *microcrack* pada kombinasi faktor ke 1 dengan menggunakan persamaan

2.3 adalah sebagai berikut:

$$\text{KRP} = \frac{\text{Panjang retakan keseluruhan di penampang yang diamati} [\mu\text{m}]}{\text{luas penampang yang diamati} [\mu\text{m}^2]}$$

$$\text{KRP} = \frac{(16,51 + 18,98 + 37,56 + 45,34 + 25,45 + 11,62) [\mu\text{m}]}{(147,59 \times 110,69) [\mu\text{m}^2]}$$

$$\text{KRP} = 0,0095 \mu\text{m}/\mu\text{m}^2$$

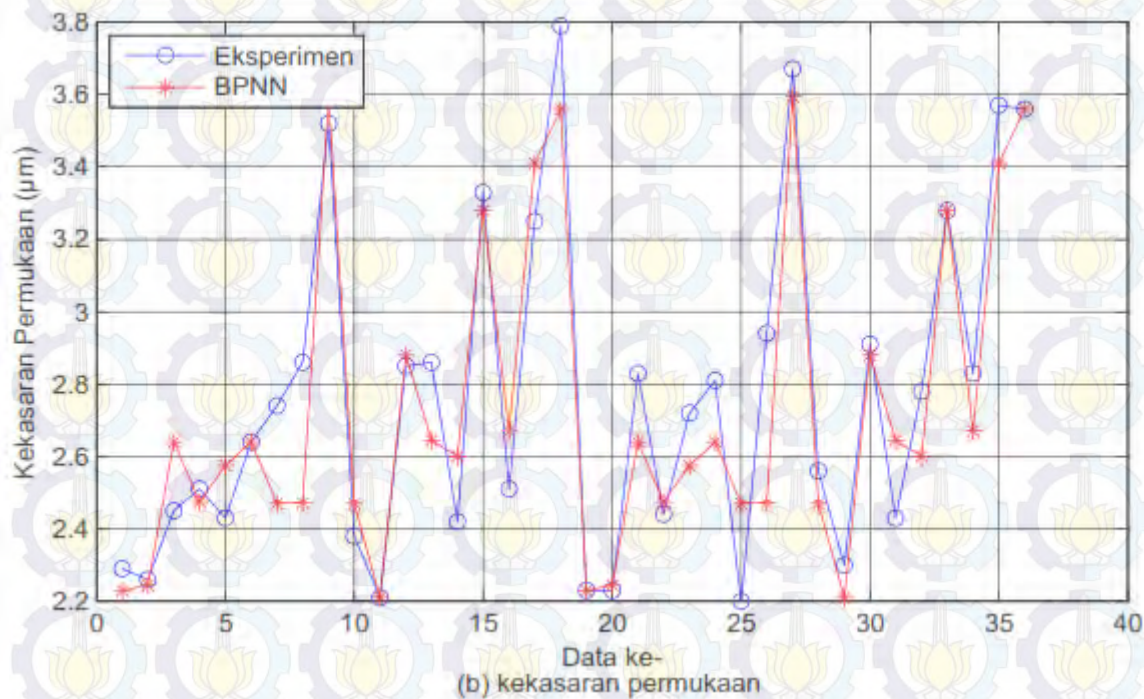
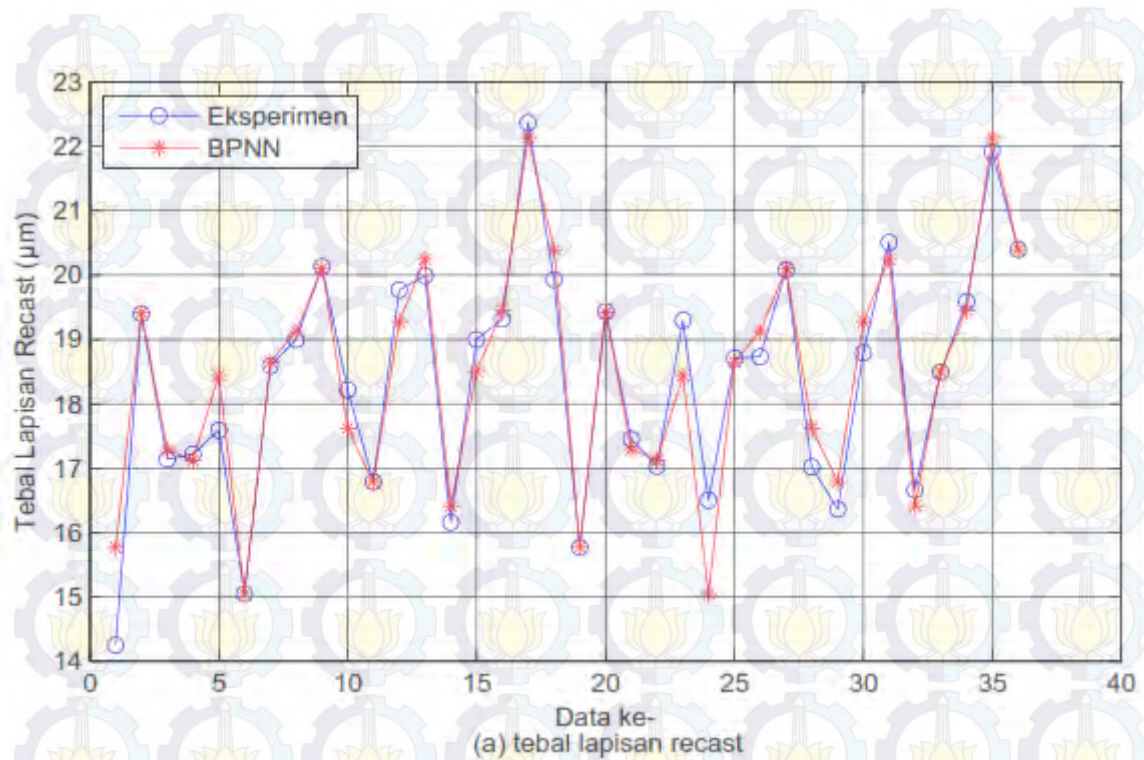
Lampiran G

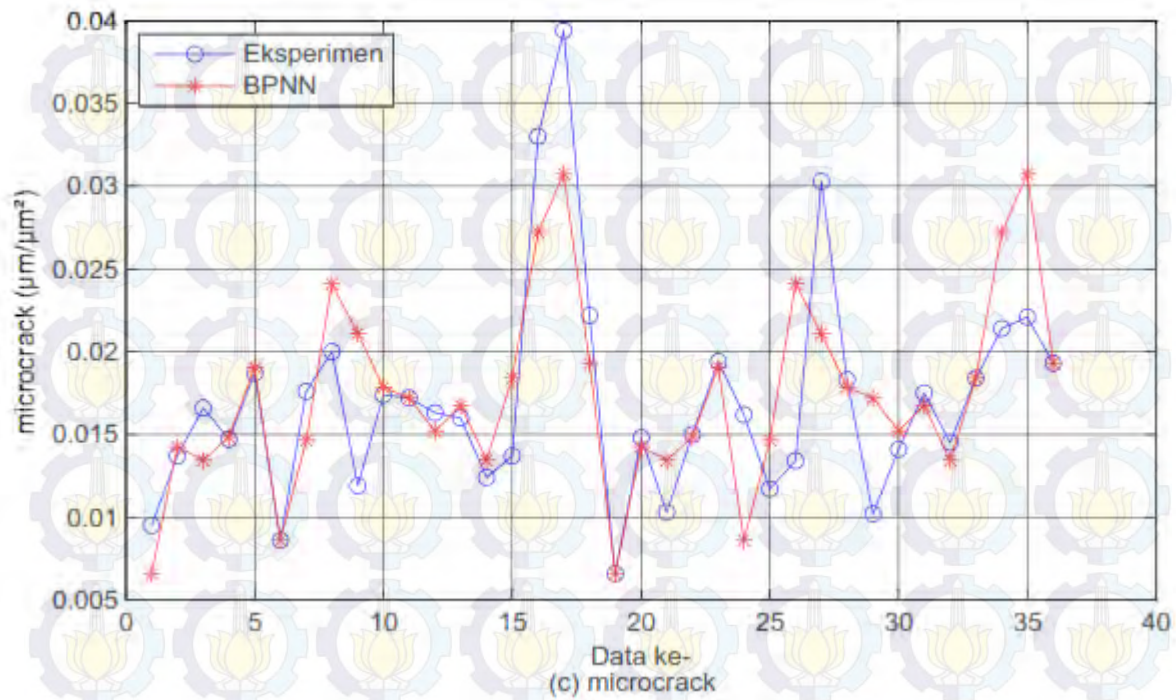
Tabel L.11 Data tebal lapisan *recast*, kekasaran permukaan dan *microcrack* dari respon hasil eksperimen, hasil peramalan dengan BPNN dan *error* (selisih hasil eksperimen dengan hasil peramalan)

| No | Tebal Lapisan Recast (μm) | | | Kekasaran Permukaan (μm) | | | Microcrack ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$) | | |
|----|--|-------|-----------|---------------------------------------|------|-----------|--|--------|-----------|
| | Eksp. | BPNN | Error (%) | Eksp. | BPNN | Error (%) | Eksp. | BPNN | Error (%) |
| 1 | 14,25 | 15,77 | -10,68 | 2,29 | 2,23 | 2,62 | 0,0095 | 0,0066 | 30,53 |
| 2 | 19,40 | 19,42 | -0,13 | 2,26 | 2,25 | 0,66 | 0,0137 | 0,0143 | -4,38 |
| 3 | 17,14 | 17,30 | -0,92 | 2,45 | 2,64 | -7,76 | 0,0166 | 0,0135 | 18,67 |
| 4 | 17,22 | 17,13 | 0,56 | 2,51 | 2,48 | 1,39 | 0,0147 | 0,0149 | -1,36 |
| 5 | 17,59 | 18,45 | -4,88 | 2,43 | 2,58 | -5,97 | 0,0187 | 0,0190 | -1,60 |
| 6 | 15,05 | 15,05 | 0,02 | 2,64 | 2,64 | 0,00 | 0,0086 | 0,0086 | 0,00 |
| 7 | 18,59 | 18,65 | -0,31 | 2,74 | 2,47 | 9,85 | 0,0176 | 0,0147 | 16,48 |
| 8 | 19,00 | 19,12 | -0,68 | 2,86 | 2,47 | 13,57 | 0,0200 | 0,0241 | -20,50 |
| 9 | 20,13 | 20,11 | 0,14 | 3,52 | 3,60 | -2,13 | 0,0119 | 0,0211 | -77,31 |
| 10 | 18,22 | 17,62 | 3,29 | 2,38 | 2,47 | -3,78 | 0,0174 | 0,0179 | -2,87 |
| 11 | 16,79 | 16,79 | 0,01 | 2,21 | 2,21 | 0,00 | 0,0172 | 0,0172 | 0,00 |
| 12 | 19,77 | 19,28 | 2,50 | 2,85 | 2,88 | -1,05 | 0,0163 | 0,0152 | 6,75 |
| 13 | 19,99 | 20,25 | -1,30 | 2,86 | 2,65 | 7,52 | 0,0160 | 0,0168 | -5,00 |
| 14 | 16,16 | 16,41 | -1,53 | 2,42 | 2,60 | -7,44 | 0,0124 | 0,0134 | -8,06 |
| 15 | 19,00 | 18,50 | 2,64 | 3,33 | 3,28 | 1,50 | 0,0137 | 0,0184 | -34,31 |
| 16 | 19,32 | 19,46 | -0,68 | 2,51 | 2,67 | -6,37 | 0,0330 | 0,0272 | 17,58 |
| 17 | 22,37 | 22,15 | 1,00 | 3,25 | 3,41 | -4,92 | 0,0394 | 0,0308 | 21,83 |
| 18 | 19,93 | 20,40 | -2,38 | 3,79 | 3,56 | 6,07 | 0,0222 | 0,0193 | 13,06 |
| 19 | 15,77 | 15,77 | -0,03 | 2,23 | 2,23 | 0,00 | 0,0066 | 0,0066 | 0,00 |
| 20 | 19,44 | 19,42 | 0,11 | 2,23 | 2,25 | -0,67 | 0,0148 | 0,0143 | 3,38 |
| 21 | 17,45 | 17,30 | 0,88 | 2,83 | 2,64 | 6,71 | 0,0103 | 0,0135 | -31,07 |
| 22 | 17,03 | 17,13 | -0,56 | 2,44 | 2,48 | -1,43 | 0,0150 | 0,0149 | 0,67 |
| 23 | 19,30 | 18,45 | 4,41 | 2,72 | 2,58 | 5,33 | 0,0194 | 0,0190 | 2,06 |
| 24 | 16,50 | 15,05 | 8,81 | 2,81 | 2,64 | 6,05 | 0,0162 | 0,0086 | 46,91 |
| 25 | 18,71 | 18,65 | 0,32 | 2,20 | 2,47 | -12,27 | 0,0117 | 0,0147 | -25,64 |
| 26 | 18,73 | 19,12 | -2,09 | 2,94 | 2,47 | 15,92 | 0,0134 | 0,0241 | -79,85 |
| 27 | 20,08 | 20,11 | -0,13 | 3,67 | 3,60 | 2,04 | 0,0303 | 0,0211 | 30,36 |
| 28 | 17,02 | 17,62 | -3,50 | 2,56 | 2,47 | 3,52 | 0,0183 | 0,0179 | 2,19 |
| 29 | 16,36 | 16,79 | -2,63 | 2,30 | 2,21 | 3,91 | 0,0102 | 0,0172 | -68,63 |
| 30 | 18,79 | 19,28 | -2,62 | 2,91 | 2,88 | 1,03 | 0,0141 | 0,0152 | -7,80 |
| 31 | 20,51 | 20,25 | 1,25 | 2,43 | 2,65 | -8,85 | 0,0175 | 0,0168 | 4,00 |
| 32 | 16,66 | 16,41 | 1,48 | 2,78 | 2,60 | 6,47 | 0,0145 | 0,0134 | 7,59 |
| 33 | 18,50 | 18,50 | -0,01 | 3,28 | 3,28 | 0,00 | 0,0184 | 0,0184 | 0,00 |
| 34 | 19,59 | 19,46 | 0,67 | 2,83 | 2,67 | 5,65 | 0,0214 | 0,0272 | -27,10 |
| 35 | 21,92 | 22,15 | -1,02 | 3,57 | 3,41 | 4,48 | 0,0221 | 0,0308 | -39,37 |
| 36 | 20,40 | 20,40 | -0,02 | 3,56 | 3,56 | 0,00 | 0,0193 | 0,0193 | 0,00 |

Sumber: Hasil perhitungan (persen eror dihitung dengan menggunakan persamaan 2.9)

Lampiran H





Gambar L.4 Grafik data eksperimen dan output peramalan pada respon (a) tebal lapisan *recast*, (b) kekasaran permukaan dan (c) *microcrack*

Lampiran I

Tabel L.12 Nilai-nilai bobot dan bias akhir peramalan, (a) nilai bobot dan bias dari *input layer* ke *hidden layer 1*, (b) nilai bobot dan bias dari *hidden layer 1* ke *hidden layer 2* dan (c) nilai bobot dan bias dari *hidden layer 2* ke *output layer*

| Neuron | (a) Nilai bobot dan bias dari <i>input layer</i> ke <i>hidden layer 1</i> | | | | | |
|--------|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Bobot | | | | | Bias |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 1 | 1,4865 | 2,6180 | -0,6336 | 0,1286 | 0,3805 | -2,1345 |
| 2 | -1,7634 | -1,4562 | -0,3968 | 0,1152 | 0,9288 | 0,8359 |
| 3 | -0,4125 | -1,5963 | -0,8855 | -1,6266 | 0,2083 | -0,7407 |
| 4 | 0,4247 | 1,8333 | -0,6099 | 0,3787 | -1,1984 | 0,4774 |
| 5 | -0,5528 | -0,7366 | 3,4137 | 1,0314 | -0,5478 | -0,7113 |
| 6 | 0,7791 | -0,7349 | 0,2747 | 0,1145 | -2,0279 | 1,0347 |
| 7 | -0,2911 | 0,4729 | 0,0388 | 1,7451 | 0,5275 | 1,7520 |
| 8 | 0,4700 | -1,5486 | 0,9789 | -1,0077 | -1,5912 | 1,8463 |

| Neuron | (b) Nilai bobot dan bias dari <i>hidden layer 1</i> ke <i>hidden layer 2</i> | | | | | | | | |
|--------|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Bobot | | | | | | | | Bias |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | -0,5514 | -0,0548 | 1,0529 | -0,3433 | 0,2903 | 0,6340 | 0,6800 | 1,2224 | 2,3202 |
| 2 | -0,1240 | 0,8747 | 0,8546 | -0,3540 | -0,6299 | -0,8189 | -0,4015 | 0,6994 | 1,1664 |
| 3 | -0,7868 | 0,5656 | 0,3849 | 0,1903 | -1,2491 | 0,0929 | 0,3116 | 0,6344 | -0,0864 |
| 4 | 0,6814 | -0,5492 | 0,2692 | 1,3242 | -0,9128 | -0,7841 | 0,1644 | -0,2547 | 0,1480 |
| 5 | 0,0226 | -0,4685 | -0,8799 | -0,3194 | 0,5835 | -0,2394 | 0,5174 | 0,7649 | 0,2972 |
| 6 | 0,2388 | 0,4922 | -0,6477 | 0,8448 | -0,3608 | -0,9086 | -0,3629 | 0,6607 | -1,0442 |
| 7 | -0,2688 | 0,4502 | 0,4398 | 1,3952 | 0,5597 | -0,2807 | -0,8724 | 0,4522 | -1,7547 |
| 8 | -1,2487 | 0,3922 | 0,8090 | 0,0539 | 1,6657 | 0,5983 | -0,3348 | -0,5074 | -1,7458 |

| Neuron | (c) Nilai bobot dan bias dari <i>hidden layer 2</i> ke <i>output layer</i> | | | | | | | |
|--------|--|--------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| | Bobot | | | | | | | Bias |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 1 | -0,1114 | 0,8404 | -0,5974 | 0,5920 | 0,5763 | -0,3728 | -0,1680 | 0,1315 |
| 2 | 0,2191 | 0,3281 | -1,0848 | -0,2497 | 0,2981 | 0,5173 | 0,5154 | -0,2700 |
| 3 | -0,6005 | 0,6526 | -0,2962 | 0,2928 | 0,7067 | -0,5906 | 1,0980 | -0,2922 |

Sumber: Hasil perhitungan

Lampiran J

Bahasa pemrograman metode peramalan dengan BPNN dan optimasi GA pada perangkat lunak adalah sebagai berikut:

```
clear all
clc

% Mendeklarasikan variabel global
global net

%% Data Hasil Eksperimen
% Parameter input (arc on time, on time, open voltage, off time, dan servo voltage)
input=[
    2 0.3 90 8 32;
    2 0.3 100 9 36;
    2 0.3 110 10 40;
    2 0.4 90 8 36;
    2 0.4 100 9 40;
    2 0.4 110 10 32;
    2 0.5 90 9 32;
    2 0.5 100 10 36;
    2 0.5 110 8 40;
    3 0.3 90 10 40;
    3 0.3 100 8 32;
    3 0.3 110 9 36;
    3 0.4 90 9 40;
    3 0.4 100 10 32;
    3 0.4 110 8 36;
    3 0.5 90 10 36;
    3 0.5 100 8 40;
    3 0.5 110 9 32;
    2 0.3 90 8 32;
    2 0.3 100 9 36;
    2 0.3 110 10 40;
    2 0.4 90 8 36;
    2 0.4 100 9 40;
    2 0.4 110 10 32;
    2 0.5 90 9 32;
    2 0.5 100 10 36;
    2 0.5 110 8 40;
    3 0.3 90 10 40;
    3 0.3 100 8 32;
    3 0.3 110 9 36;
    3 0.4 90 9 40;
    3 0.4 100 10 32;
    3 0.4 110 8 36;
    3 0.5 90 10 36;
    3 0.5 100 8 40;
    3 0.5 110 9 32];

% Parameter respon (tebal lapisan recast, kekasaran permukaan dan microcrack)
respon=[
    14.25 2.29 0.0095;
    19.40 2.26 0.0137;
    17.14 2.45 0.0166;
    17.22 2.51 0.0147;
    17.59 2.43 0.0187;
    15.05 2.64 0.0086;
    18.59 2.74 0.0176;
    19.00 2.86 0.0200;
    20.13 3.52 0.0119;
    18.22 2.38 0.0174;
    16.79 2.21 0.0172;
    19.77 2.85 0.0163;
    19.99 2.86 0.0160;
    16.16 2.42 0.0124;
    19.00 3.33 0.0137;
    19.32 2.51 0.0330;
    22.37 3.25 0.0394;
    19.93 3.79 0.0222;
    15.77 2.23 0.0066;
    19.44 2.23 0.0148;
    17.45 2.83 0.0103;
    17.03 2.44 0.0150;
    19.30 2.72 0.0194;
    16.50 2.81 0.0162;
    18.71 2.20 0.0117;
    18.73 2.94 0.0134;
    20.08 3.67 0.0303;
    17.02 2.56 0.0183;
    16.36 2.30 0.0102;
    18.79 2.91 0.0141;
    20.51 2.43 0.0175;
    16.66 2.78 0.0145;
    18.50 3.28 0.0184;
    19.59 2.83 0.0214;
    21.92 3.57 0.0221;
    20.40 3.56 0.0193];

.

=====
%% Metode Prediksi Back-propagation Neural Network
% Preprocessing data BPNN
p = input'; % Melakukan transpose matriks pada parameter input
t = respon'; % Melakukan transpose matriks pada parameter respon
[pn,ps] = mapminmax(p); % Melakukan preprocessing pada parameter input
[tn,ts] = mapminmax(t); % Melakukan preprocessing pada parameter respon
```



```

% Arsitektur jaringan BPNN
xn = 5; % Jumlah layer pada input
zn = 8; % jumlah neuron pada hidden layer 1
zsn = 8; % jumlah neuron pada hidden layer 2
yn = 3; % Jumlah layer pada output

% Jaringan BPNN yang digunakan
net = newff(minmax(pn),tn,[zn zsn],{'tansig','tansig','purelin'},'trainrp');
% Kriteria pemberhentian (stopping criteria) pelatihan BPNN
net.trainParam.epochs = 100000; % Maximum number of epochs to train
net.trainParam.time = 200; % Maximum time to train in seconds
net.trainParam.goal = 1e-3; % Performance goal
net.trainParam.min_grad = 1e-10; % Minimum performance gradient
net.trainParam.max_fail = 10; % Maximum validation failures
% Inisiasi nilai bobot dan bias
net = init(net);
% Data pelatihan BPNN
net.divideParam.trainRatio = 80/100; % Perbandingan data training
net.divideParam.valRatio = 0/100; % Perbandingan data validasi
net.divideParam.testRatio = 20/100; % Perbandingan data testing
% Laju pembelajaran
net.trainParam.lr = 0.01; % Learning rate
net.trainParam.show = 10; % Interval penampilah epoch
% Perubahan bobot dan bias
net.trainParam.delt_inc = 1.2; %Increment to weight change
net.trainParam.delt_dec = 0.5; %Decrement to weight change
net.trainParam.delta0 = 0.05; %Initial weight change
net.trainParam.deltamax = 30.0; %Maximum weight change

% Pelatihan jaringan BPNN
[net,tr] = train(net,pn,tn);
% Menghitung output BPNN
yn=sim(net,pn);

% Repreprocessing data BPNN
y = mapminmax('reverse',yn,ts);
output = y';

% Grafik data eksperimen dan data output pelatihan BPNN
%(a) tebal lapisan recast
subplot(2,2,1)
plot([1:size(p',1)]',respon(:,1),'-bo',[1:size(p',1)]',output(:,1),'-r*')
legend('Eksperimen','BPNN',2)
grid on
xlabel('Data ke-');
ylabel('Tebal Lapisan Recast ( $\mu\text{m}$ )');

%(b) kekasaran permukaan
subplot(2,2,2)
plot([1:size(p',1)]',respon(:,2),'-bo',[1:size(p',1)]',output(:,2),'-r*')
legend('Eksperimen','BPNN',2)
grid on
xlabel('Data ke-');
ylabel('Kekasaran Permukaan ( $\mu\text{m}$ )');

%(c) microcrack
subplot(2,2,3)
plot([1:size(p',1)]',respon(:,3),'-bo',[1:size(p',1)]',output(:,3),'-r*')
legend('Eksperimen','BPNN',2)
grid on
xlabel('Data ke-');
ylabel('microcrack ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$ )');

```



```

%=====
%% Metode Optimasi GA
% Menentukan batas atas dan batas bawah dari parameter yang dioptimasi
lb = [2 1 1 8 32]; % lower bound
ub = [3 3 5 10 40]; % upper bound

% Menentukan Opsi optimasi GA
options = gaoptimset(...
'PopulationSize', 150, ... % Jumlah populasi
'Generations', 20, ... % Jumlah Generasi
'EliteCount', 50, ... % jumlah individu dipakai pada generasi berikutnya.
'ParetoFraction', 0.8, ... % Proses Seleksi
'CrossoverFraction', 0.6, ... % Probabilitas crossover
'MigrationFraction', 0.4, ... % Probabilitas migrasi
'TolFun', 1e-8, ... % Nilai toleransi penghentian proses generasi
'PlotFcns', {@gaplotbestf}); % Plot grafik generasi

rng(0, 'twister'); % Mengendalikan bilangan acak dengan metode Mersenne
Twister

% Mencari nilai minimum pelatihan GA
[xbest, fbest, exitflag] = ga(@wireEDMfitnessWithDisc, 5, [], [], [], [], ...
lb, ub, [], [1 2 3 4 5], options);

% Menganalisis hasil pelatihan GA
xbest = wireEDMMapVariables(xbest);

%=====
%% Menampilkan data hasil Optimasi BPNN dan GA
tr.stop
fprintf('\n Epoch ke- = %g\n', tr.best_epoch);
fprintf('\n Error peramalan = %g\n', error);
display(xbest);

```


Lampiran K

Lampiran K.1 : Pendefinisian nilai secara diskrit

```
function fitness = wireEDMfitnessWithDisc(x)
% Nilai batas atas dan batas bawah yang bernilai diskrit
x = wireEDMMapVariables(x);
% Nilai fitness WEDM
fitness = wireEDMfitness(x);
```

Lampiran K.2 : Penyetingan untuk merubah nilai diskrit ke nilai integer

```
function x = wireEDMMapVariables(x)
% Menentukan nilai diskrit dari parameter on time dengan interval 0.1
X2 = [0.3, 0.4, 0.5];
% Menentukan nilai diskrit dari parameter open voltage dengan interval 5
X3 = [90, 95, 100, 105, 110];
% Mendefinisikan nilai integer GA dari parameter X2 dan X3
x(2) = X2(x(2));
x(3) = X3(x(3));
```

Lampiran K.2 : Fungsi *fitness*

```
function fitness = wireEDMfitness(x)
global net
%% Nilai akhir bobot dan bias
u=net.IW{1,1};
v=net.LW{2,1};
w=net.LW{3,2};
u0=net.b{1};
v0=net.b{2};
w0=net.b{3};

%% Persamaan Fitness
% hidden layer 2 ke output layer
z1 =u(1,1)*x(1)+u(1,2)*x(2)+u(1,3)*x(3)+u(1,4)*x(4)+u(1,5)*x(5)+u0(1,1);
z2 =u(2,1)*x(1)+u(2,2)*x(2)+u(2,3)*x(3)+u(2,4)*x(4)+u(2,5)*x(5)+u0(2,1);
z3 =u(3,1)*x(1)+u(3,2)*x(2)+u(3,3)*x(3)+u(3,4)*x(4)+u(3,5)*x(5)+u0(3,1);
z4 =u(4,1)*x(1)+u(4,2)*x(2)+u(4,3)*x(3)+u(4,4)*x(4)+u(4,5)*x(5)+u0(4,1);
z5 =u(5,1)*x(1)+u(5,2)*x(2)+u(5,3)*x(3)+u(5,4)*x(4)+u(5,5)*x(5)+u0(5,1);
z6 =u(6,1)*x(1)+u(6,2)*x(2)+u(6,3)*x(3)+u(6,4)*x(4)+u(6,5)*x(5)+u0(6,1);
z7 =u(7,1)*x(1)+u(7,2)*x(2)+u(7,3)*x(3)+u(7,4)*x(4)+u(7,5)*x(5)+u0(7,1);
z8 =u(8,1)*x(1)+u(8,2)*x(2)+u(8,3)*x(3)+u(8,4)*x(4)+u(8,5)*x(5)+u0(8,1);

% hidden layer 1 ke hidden layer 2
zz1 =(v(1,1)*1/(1+exp(-z1))+v(1,2)*1/(1+exp(-z2))+v(1,3)*1/(1+exp(-z3))+v(1,4)*1/(1+exp(-z4))+v(1,5)*1/(1+exp(-z5))+v(1,6)*1/(1+exp(-z6))+v(1,7)*1/(1+exp(-z7))+v(1,8)*1/(1+exp(-z8))+v0(1,1));
zz2 =(v(2,1)*1/(1+exp(-z1))+v(2,2)*1/(1+exp(-z2))+v(2,3)*1/(1+exp(-z3))+v(2,4)*1/(1+exp(-z4))+v(2,5)*1/(1+exp(-z5))+v(2,6)*1/(1+exp(-z6))+v(2,7)*1/(1+exp(-z7))+v(2,8)*1/(1+exp(-z8))+v0(2,1));
zz3 =(v(3,1)*1/(1+exp(-z1))+v(3,2)*1/(1+exp(-z2))+v(3,3)*1/(1+exp(-z3))+v(3,4)*1/(1+exp(-z4))+v(3,5)*1/(1+exp(-z5))+v(3,6)*1/(1+exp(-z6))+v(3,7)*1/(1+exp(-z7))+v(3,8)*1/(1+exp(-z8))+v0(3,1));
zz4 =(v(4,1)*1/(1+exp(-z1))+v(4,2)*1/(1+exp(-z2))+v(4,3)*1/(1+exp(-z3))+v(4,4)*1/(1+exp(-z4))+v(4,5)*1/(1+exp(-z5))+v(4,6)*1/(1+exp(-z6))+v(4,7)*1/(1+exp(-z7))+v(4,8)*1/(1+exp(-z8))+v0(4,1));
```



```

zz5 =(v(5,1)*1/(1+exp(-z1))+v(5,2)*1/(1+exp(-
z2))+v(5,3)*1/(1+exp(z3))+v(5,4)*1/(1+exp(-z4))+v(5,5)*1/(1+exp(-
z5))+v(5,6)*1/(1+exp(z6))+v(5,7)*1/(1+exp(-z7))+v(5,8)*1/(1+exp(-
z8))+v0(5,1));
zz6 =(v(6,1)*1/(1+exp(-z1))+v(6,2)*1/(1+exp(-
z2))+v(6,3)*1/(1+exp(z3))+v(6,4)*1/(1+exp(-z4))+v(6,5)*1/(1+exp(-
z5))+v(6,6)*1/(1+exp(-z6))+v(6,7)*1/(1+exp(-z7))+v(6,8)*1/(1+exp(-
z8))+v0(6,1));
zz7 =(v(7,1)*1/(1+exp(-z1))+v(7,2)*1/(1+exp(-
z2))+v(7,3)*1/(1+exp(z3))+v(7,4)*1/(1+exp(-z4))+v(7,5)*1/(1+exp(-
z5))+v(7,6)*1/(1+exp(-z6))+v(7,7)*1/(1+exp(-z7))+v(7,8)*1/(1+exp(-
z8))+v0(7,1));
zz8 =(v(8,1)*1/(1+exp(-z1))+v(8,2)*1/(1+exp(-
z2))+v(8,3)*1/(1+exp(z3))+v(8,4)*1/(1+exp(-z4))+v(8,5)*1/(1+exp(-
z5))+v(8,6)*1/(1+exp(-z6))+v(8,7)*1/(1+exp(-z7))+v(8,8)*1/(1+exp(-
z8))+v0(8,1));

% input layer ke hidden layer 1
TLR =(w(1,1)*1/(1+exp(-zz1))+w(1,2)*1/(1+exp(-zz2))+w(1,3)*1/(1+exp(-
zz3))+w(1,4)*1/(1+exp(-zz4))+w(1,5)*1/(1+exp(-zz5))+w(1,6)*1/(1+exp(-
zz6))+w(1,7)*1/(1+exp(-zz7))+w(1,8)*1/(1+exp(-zz8))+w0(1,1));
KP =(w(2,1)*1/(1+exp(-zz1))+w(2,2)*1/(1+exp(-zz2))+w(2,3)*1/(1+exp(-
zz3))+w(2,4)*1/(1+exp(-zz4))+w(2,5)*1/(1+exp(-zz5))+w(2,6)*1/(1+exp(-
zz6))+w(2,7)*1/(1+exp(-zz7))+w(2,8)*1/(1+exp(-zz8))+w0(2,1));
MC =(w(3,1)*1/(1+exp(-zz1))+w(3,2)*1/(1+exp(-zz2))+w(3,3)*1/(1+exp(-
zz3))+w(3,4)*1/(1+exp(-zz4))+w(3,5)*1/(1+exp(-zz5))+w(3,6)*1/(1+exp(-
zz6))+w(3,7)*1/(1+exp(-zz7))+w(3,8)*1/(1+exp(-zz8))+w0(3,1));

% persamaan fitness untuk meminimalkan respon
fitness = min(TLR + KP + MC);

```


BIODATA PENULIS



Nama : Prima Ahmad Wihardi
Tempat / Tanggal Lahir : Kediri, 6 Januari 1986
Alamat : Jl. Semampir Selatan 2A/73B
Medokan Semampir, Surabaya
Telepon : 0853 3075 8949
Jenis Kelamin : Laki-laki
Status : Menikah
Agama : Islam
Alamat Email : prima354@gmail.com

Latar Belakang Pendidikan

(2011-2016) : Magister Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya
(2004-2010) : Teknik Mesin, FTMD-ITB, Bandung
(2001-2004) : Sekolah Menengah Atas Negeri 1, Kediri
(1998-2001) : Sekolah Menengah Pertama Negeri 1, Grogol, Kediri
(1992-1998) : Sekolah Dasar Negeri Gambyok III, Grogol, Kediri

Judul Penelitian

Optimasi Tebal Lapisan *Recast*, Kekasaran Permukaan dan *Microcrack* Pada Proses Pemesinan *WireElectrical DischargeMachining* (WEDM) Baja Perkakas SKD61 dengan Menggunakan Metode Optimasi *Back-Propagation Neural Network* (BPNN) dan *Genetic Algorithm* (GA).

Judul Publikasi Ilmiah

Pemodelan Proses EDM *Sinking* dengan Menggunakan Metode *Back-Propagation Neural Network* (BPNN).